



# 直立堤迎浪面小角度变化的波浪力分析

王浩霖, 张 月, 赵 晶

(中国人民解放军 91053 部队, 北京 100071)

**摘要:** 基于 FLOW-3D 软件, 采用推板造波及孔隙消波相结合的方法构建三维数值波浪水池, 研究直立堤在波向与迎浪面小角度 ( $\leq 15^\circ$ ) 变化时所受波浪力。数值模拟结果表明: 1) 墙面测点波浪力在各堤面坡度及各测点之间随波向的变化趋势大体相似, 在  $90^\circ$  波向时有最大值。2) 同一堤面坡度下墙底各测点之间波浪力随波向的变化趋势不尽相同, 同时堤面坡度的存在会影响其变化趋势。3) 波浪力在墙面上的分布, 无论是在何种堤面坡度或任一波向作用下都基本相同。4) 墙底波浪力近似梯形分布。5) 在大多数波向下, 墙面及墙底测点波浪力的最大值出现于堤面具有一定坡度时。

**关键词:** 数值波浪水池; 直立堤; 斜向波; 波浪力; FLOW-3D; 堤面坡度

**中图分类号:** P 751; TV 139.2; U 656

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)07-0029-10

## Wave force on sloping wall of vertical breakwater with small changes in slope

WANG Hao-lin, ZHANG Yue, ZHAO Jing

(Troops 91053 of the People's Liberation Army, Beijing 100071, China)

**Abstract:** By the software FLOW-3D, a three-dimensional (3D) numerical wave pool is constructed by the combination of the piston-type wave generation and the pore wave absorption to study the wave force on the vertical breakwater when the wave direction and the sloping wall change at a small angle (less than or equal to  $15^\circ$ ). The following conclusions can be drawn by the numerical simulation: 1) For the wave force at the measuring points on the wall, it has a similar trend to the wave direction at all slopes of the breakwater and among all measuring points, and it reaches the maximum at a wave direction of  $90^\circ$ . 2) At the same slope of the breakwater, the variation trend of wave force with the wave direction among all measuring points at the bottom of the wall is not the same, and the slope of the breakwater can affect the variation trend. 3) The distribution of wave force on the wall is basically the same regardless of the slope of the breakwater or the action of any wave direction. 4) The distribution of wave force at the bottom of the wall is approximately trapezoidal. 5) In most wave directions, the maximum wave force at the measuring points on the wall and at the bottom of the wall occurs when the breakwater has a certain slope.

**Keywords:** numerical wave pool; vertical breakwater; oblique wave; wave force; FLOW-3D; slope of breakwater

直立堤作为防波堤的重要结构形式, 在实际工程中得到广泛应用。目前设计直立堤时, 多按单向波正向击堤计算波浪力, 且其断面多为直墙, 斜向波作用下迎浪面有一定坡度的直立堤的研究并不常见。对于直立堤所受波浪力的研究, Gaillard<sup>[1]</sup>于 1904 年提出的作用于直立堤上的破碎波动水压力公式, 是最早的波压力计算公式。

Sainflou<sup>[2]</sup>根据椭圆余摆线波理论推导出立波的波浪压力计算方法, 认为波压力在水面处有最大值, 近似梯形分布。合田良实<sup>[3]</sup>根据大量模型试验及对原体防波堤的检验, 提出了适用于立波和破碎波波浪力计算的统一公式, 并考虑了斜向波的影响。Kirkgöz<sup>[4]</sup>通过试验研究了堤面坡度变化时水深对破碎波浪力的影响, 结果显示: 随着堤

收稿日期: 2021-11-05

作者简介: 王浩霖(1992—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事海岸工程波浪物理模型试验研究。

面坡度的增大,最大波压力出现的临界水深范围逐渐减小,据此提出临界水深的近似计算公式。JTS 145—2015《港口与航道水文规范》<sup>[5]</sup>针对立波、远破波和近破波 3 种波态分别给出了波浪力计算公式。对于斜向波的研究, Battjes<sup>[6]</sup> 基于线性理论给出了斜向波作用时单元堤上水平波浪力沿单元堤纵向折减系数的计算公式。Fenton<sup>[7]</sup> 基于 Hsu 短峰波理论,提出了作用在直墙上的波浪力和力矩的改进三阶公式,认为斜向入射时作用在直墙上的波浪力最大。Chen 等<sup>[8]</sup> 基于 OpenFOAM 中的动网格边界技术,参照传统的蛇形造波原理在数值水池中模拟了斜向波的生成,与理论结果符合较好。李玉成等<sup>[9]</sup> 通过斜向规则波与直墙相互作用的试验研究,得出斜向波浪力与正向力之比的折减系数经验公式。俞聿修等<sup>[10]</sup> 通过试验得出:斜向波作用于直立堤上的单位堤长波浪力在规则波和波陡较小的不规则波作用下,随入射角的增大而增大,常在 45° 时达最大值。顾倩等<sup>[11]</sup> 基于试验探讨了波浪入射角度、相对板宽及相对波高等因素对双层水平板式防波堤消浪效果的影响,结

果表明:波浪斜向入射时的波能衰减系数有所降低,但反射系数有所增大。对于波浪数值模拟的研究, Lin 等<sup>[12]</sup> 提出了基于 N-S 方程,将附加质量源添加到连续方程的质量源造波方法,并对规则波与不规则波进行了模拟。丁阳等<sup>[13]</sup> 利用 FLOW-3D 软件,采用质量源造波及海绵层消波的方法建立三维波流数值水槽,能够形成稳定的波流场,用于研究波流对结构的联合作用。杨锦凌等<sup>[14]</sup> 基于 Mike 21 BW 模型研究了不规则波以一定角度作用直立式码头时泊位的波高情况,与试验吻合较好。

本文基于经过试验验证的 FLOW-3D 数值模型<sup>[15]</sup>,对斜向波作用下直立堤迎浪面小角度变化时的波浪力进行研究,探讨其随波向及坡度变化时的分布规律。

1 模型方案

基于文献[15],本文研究了 4 种直立堤断面形式,其堤面坡度  $\alpha$  (迎浪面与竖直方向的夹角) 分别为 0°、5°、10° 及 15°。以 0° 堤面坡度为例,其立面图和断面图以及测点布置见图 1。

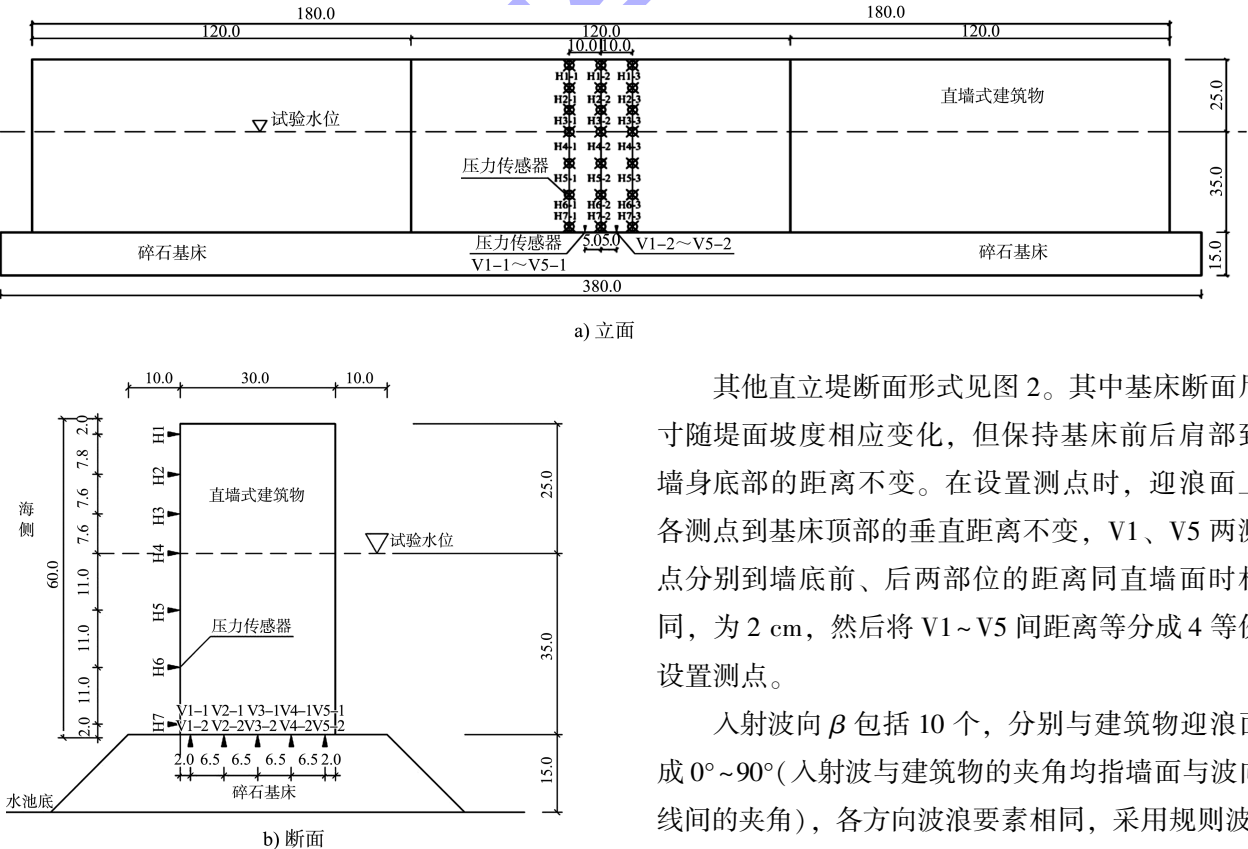


图 1  $\alpha=0^\circ$  模型 (单位: cm)

其他直立堤断面形式见图 2。其中基床断面尺寸随堤面坡度相应变化,但保持基床前后肩部到墙身底部的距离不变。在设置测点时,迎浪面上各测点到基床顶部的垂直距离不变, V1、V5 两测点分别到墙底前、后两部位的距离同直墙面时相同,为 2 cm,然后将 V1~V5 间距离等分成 4 等份设置测点。

入射波向  $\beta$  包括 10 个,分别与建筑物迎浪面成 0°~90° (入射波与建筑物的夹角均指墙面与波向线间的夹角),各方向波浪要素相同,采用规则波,取水深  $d=0.5$  m,波高  $H=0.1$  m,周期  $T=1.7$  s。

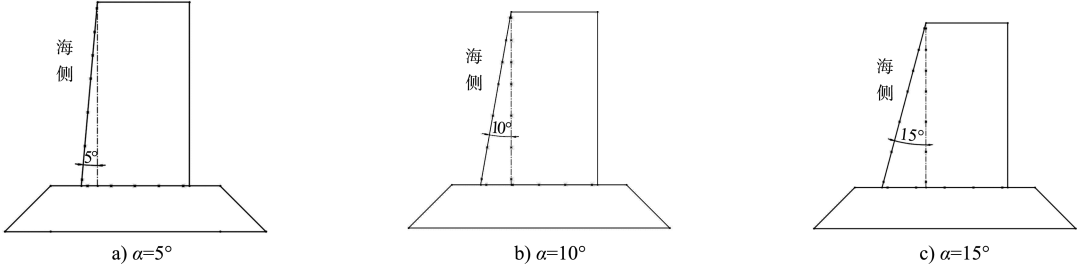


图 2 模型断面形式

## 2 三维数值模型的建立

### 2.1 控制方程

数值建模采用连续性方程和不可压缩黏性流体运动的 Navier-Stokes 方程作为流体运动的控制方程。连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $p$  为压力;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为对应  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度分量;  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  和  $V_F$  分别为与 FLOW-3D 中 FAVOR 网格技术相关的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向可流动的面积分数和可流动的体积分;  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$  为物体在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的重力加速度;  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的黏滞力加速度。

本文所建立的三维数值波浪水池要模拟波浪与建筑物的相互作用, 波浪会出现剧烈的变形破碎, 因此采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型作为湍流模型效果较好。湍动能  $k_T$  和其耗散率  $\varepsilon_T$  的方程表达式如下:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + \text{Diff}_{k_T} - \varepsilon_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{\text{CDIS}_1 \cdot \varepsilon_T}{k_T} P_T + \text{Diff}_{\varepsilon_T} - \text{CDIS}_2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (4)$$

式中:  $P_T$  为剪切效应引起的湍动能产生项;  $\text{Diff}_{k_T}$

和  $\text{Diff}_{\varepsilon_T}$  为扩散项;  $\text{CDIS}_1$  和  $\text{CDIS}_2$  为模型参数。

### 2.2 数值造波与消波方法

本文采用推板造波的仿物理造波法。通过在数值水池一端添加一 GMO (general moving object) 模型组分模拟推板。根据朱萍等<sup>[16]</sup>对造波机参数的研究, 确定推板参数与波浪要素之间的关系, 即目标波高  $H$  与行程  $S$  之比为:

$$\frac{H}{S} = \frac{4 \sinh^2(kd)}{2kd + \sinh(2kd)} \quad (5)$$

式中:  $k$  为波数, 即  $k = 2\pi/L$ ,  $L$  为波长;  $d$  为水深。推波板做来回往复直线运动时的速度  $v$  表达式为:

$$v = \frac{1}{2} \omega S \cos(\omega t) \quad (6)$$

式中:  $\omega = 2\pi/T$ , 为波浪的圆频率。据此, 在 FLOW-3D 的用户子程序 mvbvel\_usr.f 中通过添加推板运动的表达式来实现规则波的模拟。

数值水池的消波采用孔隙结构进行处理。水流遇到孔隙结构会发生紊动, 能量耗散巨大, 从而产生消波效果。文献[17]建议选取孔隙率为 0.8、斜坡坡度为 1:3、材料粒径为 0.1 m 的斜坡式孔隙结构作为消波设施, 其结构形式见图 3。

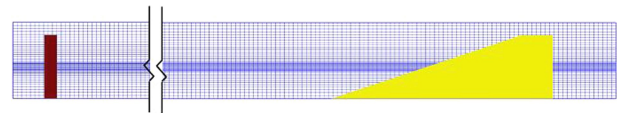


图 3 孔隙消波结构

### 2.3 边界条件与初始条件

三维数值模型的边界条件见图 4。因使用推板造波及孔隙消波的方法, 水池在  $X$  轴向上的两端 (即前端和末端) 需设为壁 (wall) 边界; 水池底面同样设为壁 (wall) 边界; 在自由表面上压力需要满

足动力学边界条件， $p_s = p_a$ ， $p_a$ 为大气压，因此顶部设为压力(specified pressure)边界；剩余两面设为对称(symmetry)边界，可避免波浪反射的影响。

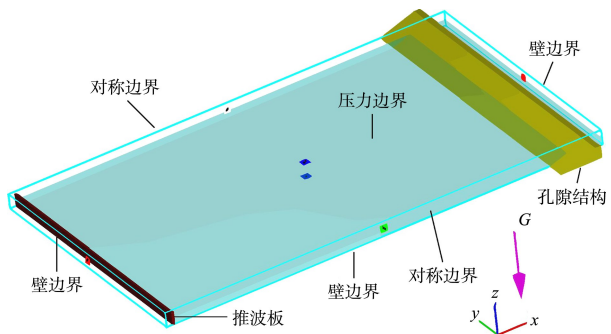


图 4 边界条件

初始条件：在计算域内，压强设定为静水压强；添加一水深为 0.5 m 的流体区域，其范围设定为推板至水池末端；初始波面设为静水水面。

2.4 模型建立与网格划分

本文所建三维数值波浪水池两侧边界与防波堤模型两端相距 12 m，通过色散方程求得波长为 3.32 m，堤头与水池边界的间距大于 3 倍平均波长，满足 JTJ/T 234—2001《波浪模型试验规程》<sup>[18]</sup> 要求。本文通过改变结构的轴线方向实现波浪不同角度的入射。图 5 为 0°堤面坡度时波浪正向入射模型。

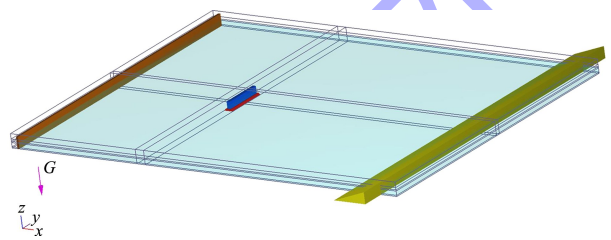


图 5  $\alpha=0^\circ$ 模型示意

FLOW-3D 中采用结构化网格划分计算域。考虑计算效率的影响，在垂向波高范围内等分 10 个单元，其余采用渐变网格。在测点区域划分网格时要适当加密，以保证所求结果的准确性。模型部分网格见图 6，在加密区域，X、Y 方向网格间距取为 0.05 m；Z 方向上除了如上述在波高范围内加密外，在 0.1 m 和 0.75 m 处设置网格尺寸为 0.05 m；在 X、Y、Z 方向的两端网格尺寸设为 0.07 m。由于在不同工况下需要转动直立堤，因此加密区域不是固定不变的。图 6 中模

型基床类似消波结构，为多孔介质，其孔隙率设为 0.1。本文数值模型已经过验证，见文献[15]。

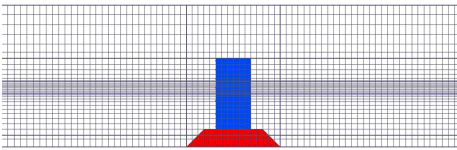


图 6  $\alpha=0^\circ$ 模型网格划分

3 数值结果分析

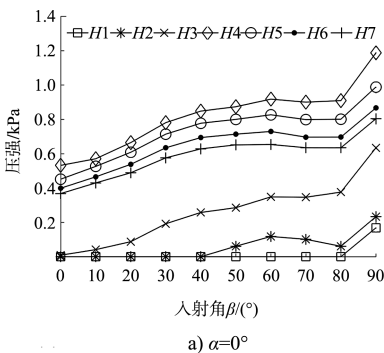
本文研究的波浪力为动水压力，正值表示波压力，负值表示波吸力。取有效造波时间内(约 10~13 个波周期)波浪力峰值或谷值的平均值进行分析，其中 H1、H2 两点的波浪力值在各工况下均较小且其变化规律不明显，在此不予考虑。

3.1 直立堤波压力数值结果分析

各堤面坡度下墙面及墙底各测点随波向变化的波压力曲线见图 7、8。

由图 7 可知：1)各堤面坡度下墙面各测点波压力随波向的变化趋势基本相同，均呈先增大后减小再增大的变化趋势，在 70°或 80°有极小值，在 90°波向时波压力值最大；2)随着堤面坡度的增大，墙面测点波压力随波向的变化趋于平缓，特别是在 30°~60°波向尤其明显。极小值的产生有可能是受短峰波或波浪破碎的影响。

从图 8 中可以看出：1) V1、V2 两测点(堤底迎浪侧)在堤面坡度不同时其波压力随波向的变化不尽相同，其最大值一般出现在 90°波向；2) V3~V5 测点(堤底背浪侧)的波压力均呈先减小后增大的趋势，测点 V3 在 0°和 90°时的波压力值大小相近，V4 及 V5 两测点波压力的最大值均出现在 0°波向。



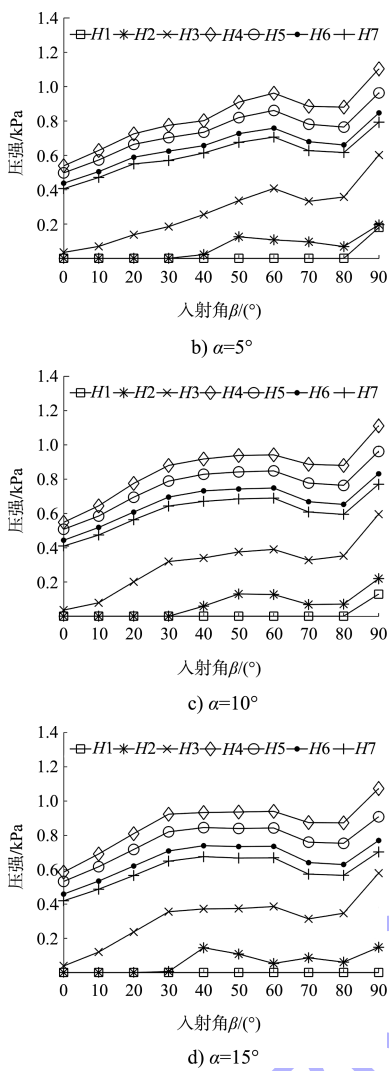


图 7 各堤面坡度下墙面测点的波压力随波向变化的曲线

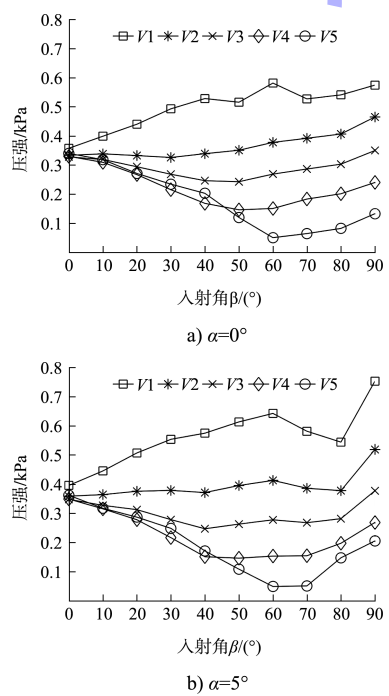
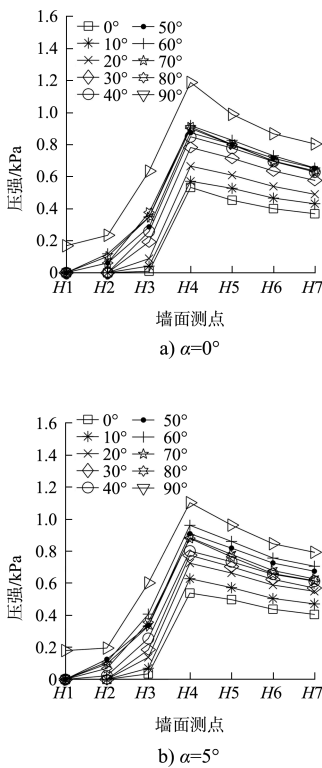
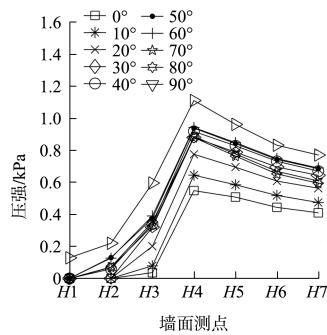


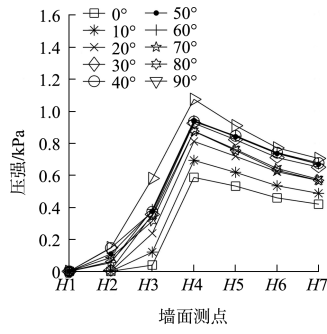
图 8 各堤面坡度下墙底测点的波压力随波向变化的曲线

各堤面坡度下墙面波压力在各波向时的分布见图 9。可以看出：墙面波压力分布形式基本相同，从直墙顶部到底部呈先增大后减小的变化趋势，在水面处有最大值，而且各测点  $90^\circ$  波向时直立堤堤面波压力值最大。





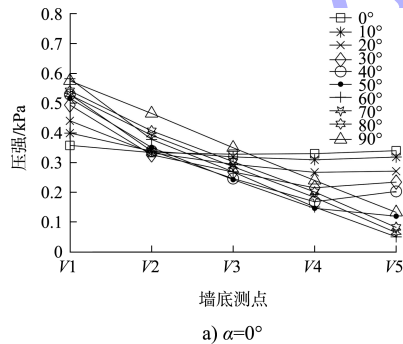
c)  $\alpha=10^\circ$



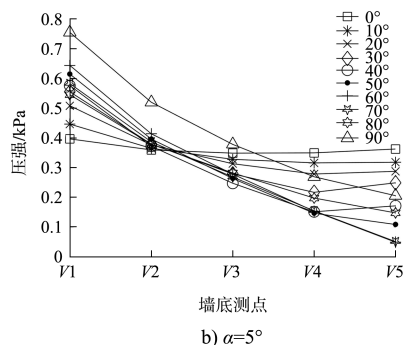
d)  $\alpha=15^\circ$

图 9 各堤面坡度下墙面波压力分布

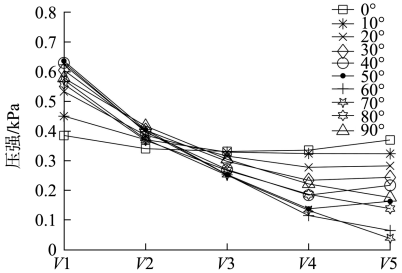
对于墙底波压力的分布，通过分析图 10 可知，各堤面坡度下，随着入射波向角度的增大，墙底波压力的分布曲线斜率逐渐增大，墙底波压力整体上呈由前至后逐渐减小趋势，但在某些波向测点 V5 的压力值明显大于 V4。



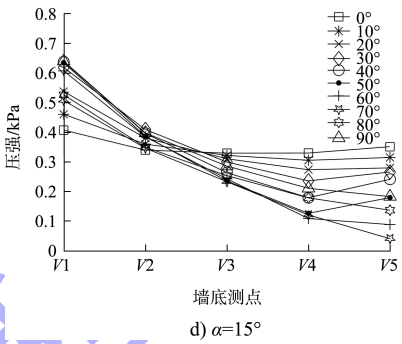
a)  $\alpha=0^\circ$



b)  $\alpha=5^\circ$



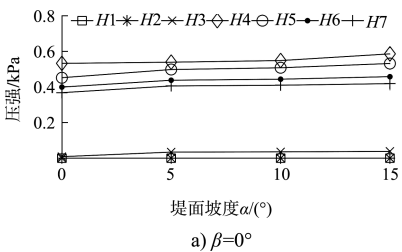
c)  $\alpha=10^\circ$



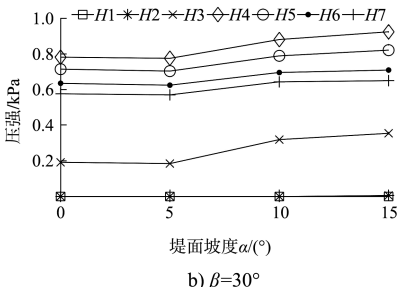
d)  $\alpha=15^\circ$

图 10 各堤面坡度下墙底波压力分布

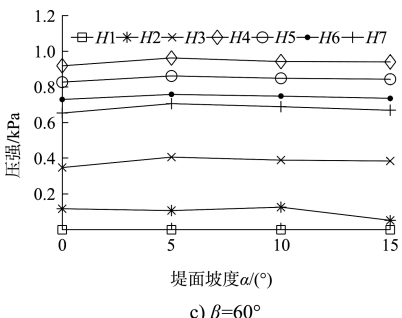
各波向下墙面及墙底各测点波压力随堤面坡度变化的曲线见图 11、12，仅给出 0°、30°、60° 及 90° 波向时测点波压力的变化曲线。



a)  $\beta=0^\circ$



b)  $\beta=30^\circ$



c)  $\beta=60^\circ$

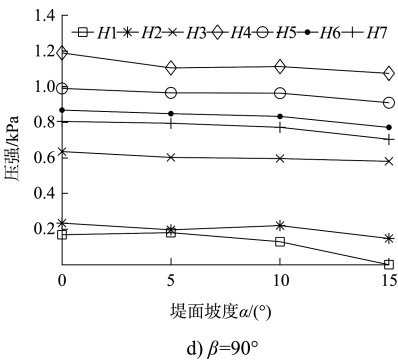


图 11 各波向下墙面各测点波压力随堤面坡度变化的曲线

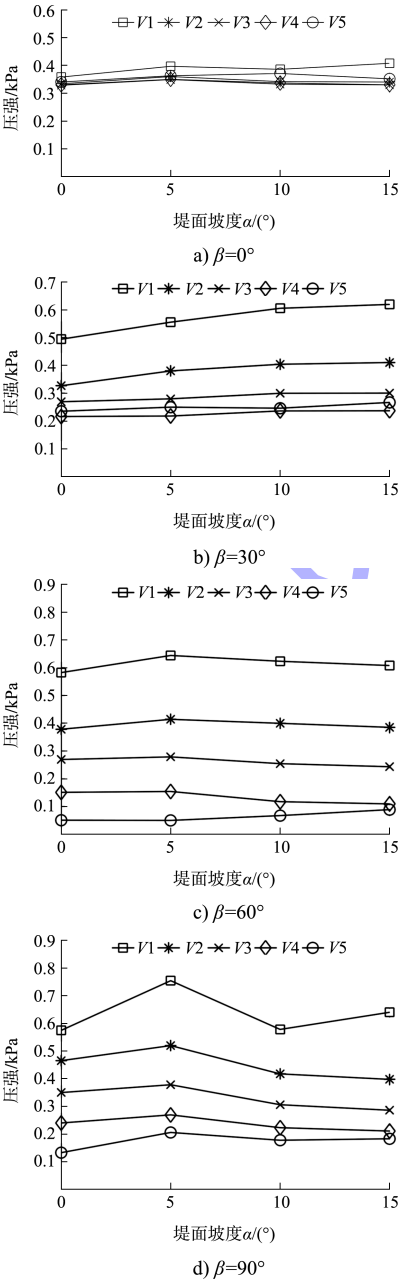


图 12 各波向下墙底各测点波压力随堤面坡度变化的曲线

由图 11 可知, 随着波向的增大, 总体上墙面测点波压力随堤面坡度由逐渐增大向逐渐减小转

变, 最大值所在堤面坡度由 15°向 0°逐步渐变。

由图 12 可知, 墙底测点的受力较为复杂, 各测点波压力的的变化趋势规律性不强, 但可以看出, 各测点波压力的最大值并不一定出现在 0°堤面。

3.2 直立堤波吸力数值结果分析

各堤面坡度下墙面及墙底各测点随波向变化的波吸力曲线见图 13、14。

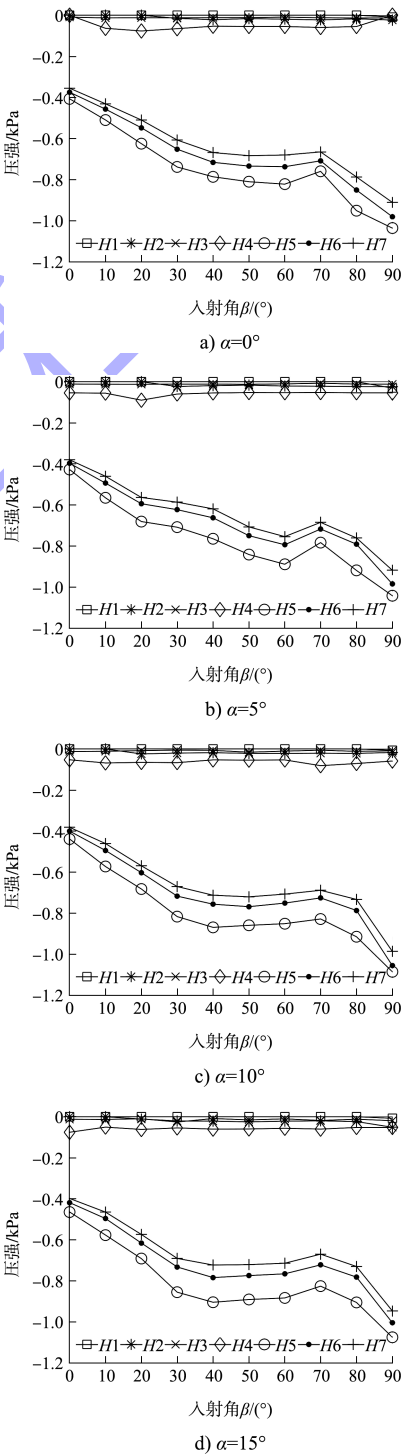


图 13 各堤面坡度下墙面测点的波吸力随波向变化的曲线

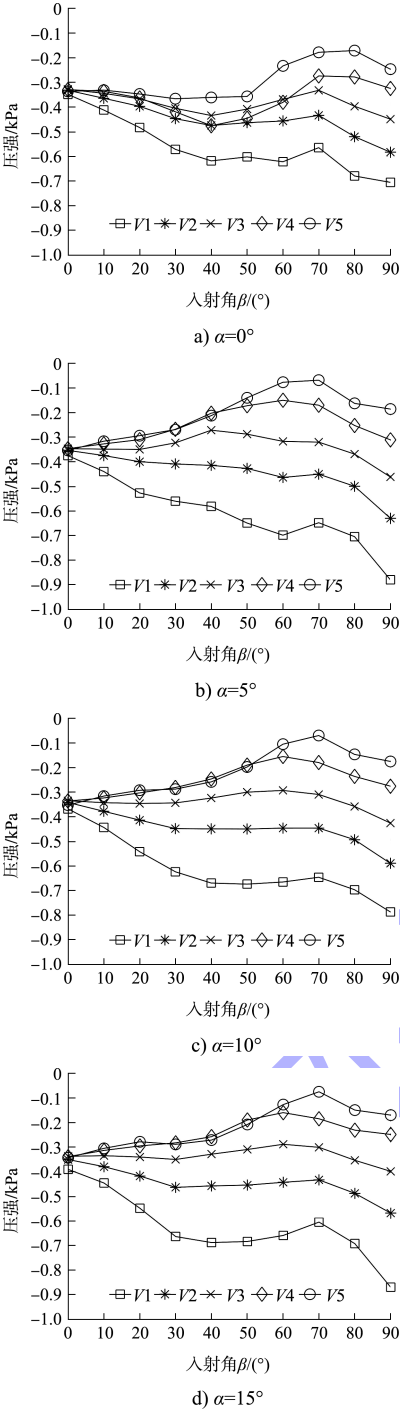


图 14 各堤面坡度下墙底测点的波吸力随波向变化的曲线

由图 13 可以看出：1) 各堤面坡度下墙面各测点波吸力随波向的变化大体相同，均呈先增大后减小再增大的变化趋势，在 90°波向时最大，且各测点波吸力均在 70°波向时有极小值；2) 随着堤面坡度的增大，在 30°~60°波向，墙面测点波吸力随波向的变化趋于平缓，并由逐渐增大向逐渐减小转变。

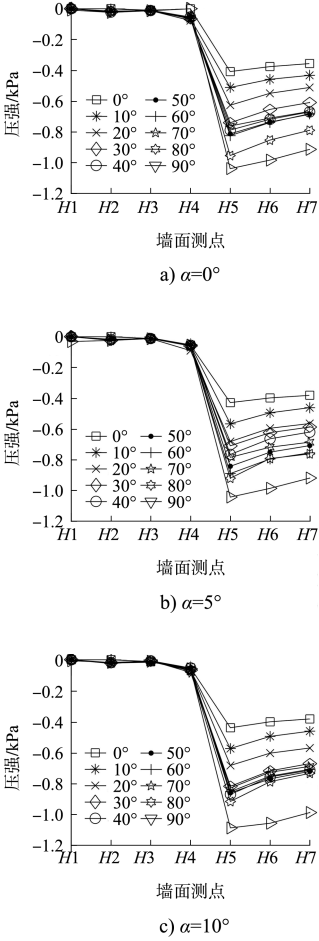
由图 14 可知：1) V1、V2 测点的波吸力值在各堤面坡度下整体上以先增大后减小再增大的趋

势变化，在 90°波向时有最大值；2) 对于 V3~V5 测点，其波吸力值在 0°堤面坡度呈先增大后减小再增大的趋势，在 40°波向有最大值；在其他 3 个堤面坡度，其波吸力整体上呈先减小后增大的变化趋势，此时 V4、V5 测点在 0°波向时有最大值，V3 测点的变化则是随堤面坡度的增加趋于平缓，0°和 90°波向时的波吸力值逐渐接近。

通过对比图 7、13 和图 8、14 可以发现：将其中一图翻转后其曲线的变化趋势与另一图较为相似，说明波压力与波吸力随波向的变化趋势大致相同。

各迎浪面坡度下墙面及墙底的波吸力在各波向时的分布见图 15、16。由图 15 可知，墙面波吸力的分布形式基本相同，从直墙顶部到静水面处的波吸力值基本可以忽略不计，从静水面到墙身底部波吸力先增大后减小，其最大值出现在测点 H5 附近。

墙底波吸力的分布见图 16，从整体来看，各堤面坡度下墙底波吸力在各波向时的分布近似呈梯形由前到后逐渐减小，且随着波向的增大越来越明显。



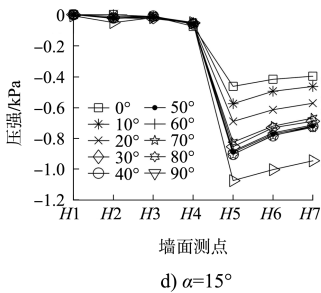


图 15 各堤面坡度下墙面波吸力分布

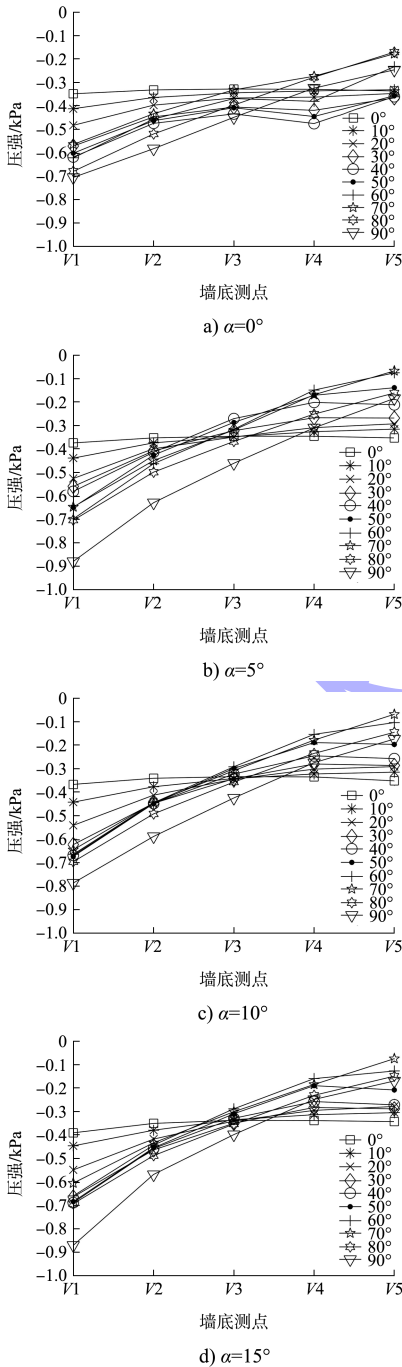


图 16 各堤面坡度下墙底波吸力分布

各波向下墙面及墙底各测点波吸力随堤面坡度变化的曲线见图 17、18。此处仅给出 4 个波向

下测点波吸力的变化曲线。分析图 17 可知：同一波向下墙面各测点波吸力的变化趋势基本一致，其最大值多出现于堤面具有一定坡度时。由图 18 可知：1) V1、V2 测点波吸力的变化趋势随波向增大近似由逐渐增大向先增大后减小转变，最大值基本上都出现于堤面有一定坡度时；2) V3~V5 测点波吸力随堤面坡度的变化趋势较一致，随波向的增大由先减小后增大向逐渐减小转变，最大值均位于 0°堤面。

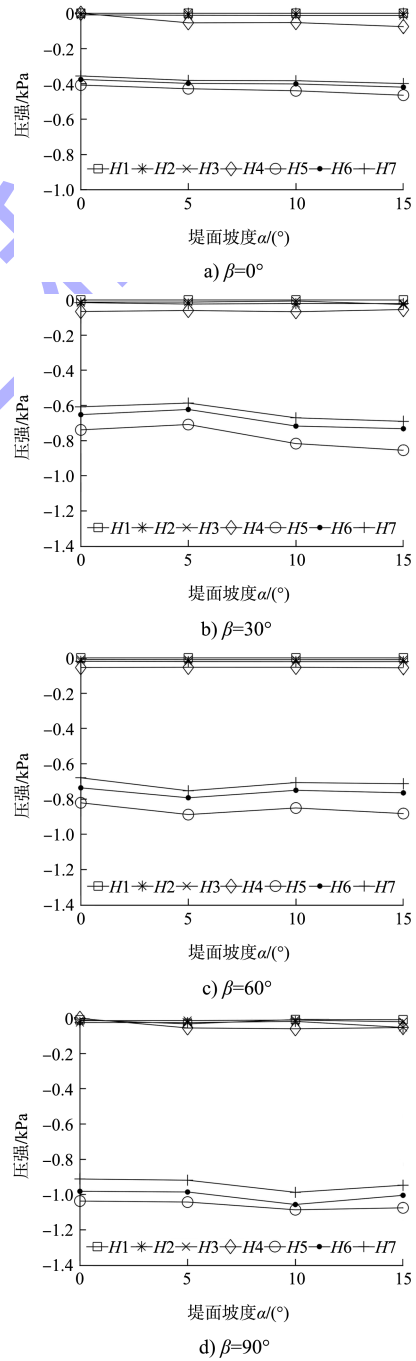


图 17 各波向下墙面各测点波吸力随迎浪面坡度变化的曲线

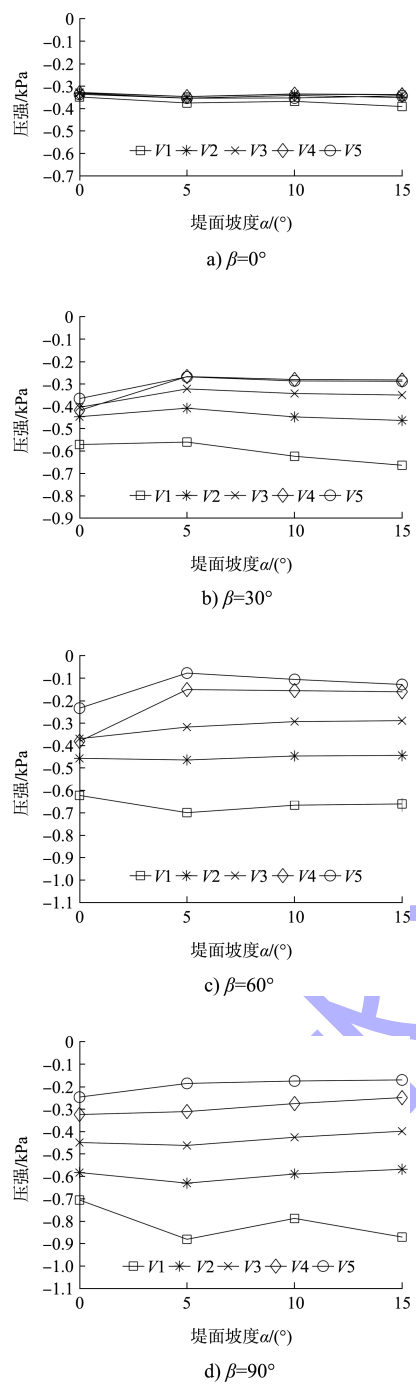


图 18 各波向下墙底各测点波吸力  
随迎浪面坡度变化的曲线

4 结论

1) 各堤面坡度下墙面各测点波压力(波吸力)随波向的变化基本相同,均呈先增大后减小再增大的变化趋势,在 90°波向时有最大值;对于墙底测点来说,同一堤面坡度下各测点波压力(波吸力)随波向的变化趋势不尽相同,同时堤面坡度的存在会影响其变化趋势,但从整体来看, V1、V2

测点波浪力的最大值基本上位于 90°波向, V4、V5 测点则是在 0°波向, V3 测点的最大值在 0°、90°波向两者之间转换,但大小接近。

2) 墙面波压力(波吸力)的分布形式基本相同,波压力在水面处有最大值,而波吸力则是在测点 H5 附近存在最大值;同一堤面坡度下墙底波压力(波吸力)的分布曲线随波向的增大呈逆时针旋转,曲线斜率逐渐增大,分布形式近似呈梯形由前到后逐渐减小,且由于波浪绕射强弱的差别,在某些波向作用时 V5 测点(即后趾附近)波浪力会大于 V4 测点。

3) 工程中斜坡堤因其斜坡的存在使其消浪效果优于直立堤;但对于直立堤来说,其迎浪面发生小角度变化时,并不是坡度越大其所受波浪力越小,在大多数波向作用下墙面及墙底测点波压力或波吸力的最大值出现于堤面具有一定坡度时。

4) 在实际工程中需要针对具体波况采用合适的直立堤断面形式,以保证设计的安全性和经济性。

参考文献:

[1] GAILLARD D D B. Wave action in relation to engineering structures[M]. Washington D. C. : US Government Printing Office, 1904.

[2] SAINFLOU G. Essai sur les digues maritimes verticales[J]. Annales des ponts et chaussées, 1928, 98( 11) : 5-48.

[3] 合田良实(日). 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, 1984: 109-149.

[4] Kirkgöz M S. Influence of water depth on the breaking wave impact on vertical and sloping walls[J]. Coastal engineering, 1992, 18( 3/4) : 297-314.

[5] 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.

[6] BATTJES J A. Effects of short-crestedness on wave loads on long structures[J]. Applied ocean research, 1982, 4( 3) : 165-172.

[7] FENTON J D. Wave forces on vertical walls[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1985, 111( 4) : 693-718.

( 下转第 44 页)