

文章编号:1005-9865(2023)02-0161-08

一种起伏板防波堤最优支撑刚度计算方法

王 塑¹, 赵西增^{1, 2}

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 浙江海洋大学 海洋工程装备学院, 浙江 舟山 316022)

摘 要:带有弹簧支撑的水平板结构,可在波浪作用下起伏运动进行消浪,作为防波堤具有广泛的应用前景,但如何设计支撑刚度仍是当前研究的重点课题。基于黏性流理论建立数值波浪水槽,开展规则波与起伏板防波堤相互作用的模拟,得到起伏板透反射系数随支撑刚度的变化曲线,并分析最小透射系数对应刚度下起伏板运动相位对消浪的影响。为快速得到最小透射系数对应的支撑刚度,根据弹簧—阻尼—质量模型,建立一种以运动相位为输入反推起伏板最优支撑刚度的计算方法,并将推导结果与数值结果进行比较。结果表明,该方法推导的最优支撑刚度值与数值最优值接近,且可省去遍历取最优值的步骤,可为起伏板防波堤的支撑刚度设计提供参考。

关键词:起伏板;防波堤;黏性流;受迫振动;数值模拟

中图分类号:TV139.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2023.02.016

A method for obtaining the optimal support stiffness of heaving plate breakwater

WANG Su¹, ZHAO Xizeng^{1, 2}

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. School of Marine Engineering Equipment, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Horizontal plate with an elastic support can form heaving responses under waves to improve its wave dissipation performance, which has great potential to serve as a breakwater, but how to design the support stiffness is still the key topic of current research. In this study, a numerical wave flume is established based on the viscous flow theory, the interaction between regular waves and heaving plate breakwater is simulated, the variation of the transmission/reflection coefficient of the heaving plate with support stiffness is obtained, and the plate's phase corresponding to the minimum transmission coefficient on the wave dissipation effect is analyzed. In order to quickly obtain the support stiffness corresponding to the minimum transmission coefficient, the spring-damping-mass model is introduced to establish a method for calculating the optimal support stiffness by inputting the moving phase, and the deduced stiffness and the numerical optimal stiffness are compared. The results show that the optimal support stiffness derived by this method is close to the numerical optimal value, therefore the traversing step can be omitted. This method can provide guidance for support stiffness design of heaving plate breakwater.

Keywords: heaving plate; breakwater; viscous flow; forced oscillation; numerical simulation

波浪作为海洋环境中一种常见的水动力现象,在向近岸传播过程中易受浅水变形影响,可对港口码头、海上平台、跨海桥梁等结构物造成破坏,严重威胁上方人员的作业安全并影响经济生产。防波堤作为减少波浪灾害、维护港区稳定的近海工程结构物,可根据是否沉底分为重力式与透空式防波堤。透空式防波堤利用波浪能量集中于水体表面的特点,相比传统重力式防波堤,可节约基础部分材料,有着布设成本低、施

收稿日期:2022-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51979245)

作者简介:王 塑(1999—),男,硕士研究生,主要从事波浪与结构物相互作用研究。E-mail: 979659780@qq.com

通信作者:赵西增,博士,教授,博士生导师。E-mail: xizengzhao@zju.edu.cn

工简便等优势^[1],但其消浪能力也相对较弱,因此开展透空式防波堤的结构优化研究具有重要意义。

水平板式防波堤作为透空式防波堤的一类重要选型,目前已衍生出多种结构类型。Cheong 和 Patarapanich^[2]研究了双层水平板的消浪性能,并总结出双层结构拥有比单层更高的反射系数。王国玉等^[3]研究了多层水平板板间距、相对宽度对防波堤消浪性能的影响。Yu 和 Togashi^[4]开展了多孔介质板对波浪透射性能的研究。Wu 等^[5]将数值模型扩展至三维情况,重现了孤立波通过多孔介质板的物理过程,并分析了板上开孔对波浪透射性能的影响。

近年来,将水平板在波浪下的振动响应运用于消波成为了学者关注的新课题。宋子路等^[6]通过试验研究了水平板在弹性支撑下受到的波浪冲击压力(模型如图 1),并得出弹性支撑具有显著的减震效果。Liu 等^[7]基于势流理论,率先提出将板在波浪作用下的起伏效应用于防波堤设计,相比固定板防波堤,起伏板可在最优支撑刚度下使规则波的基频透射系数达到几乎为 0。在以上研究的基础上,He 等^[8]采用光滑粒子流体动力学(SPH)方法对起伏板的最佳浸没深度展开了研究,得到板安装的相对潜深为 17% 时拥有最好的消浪能力。王贤梦等^[9]综合研究了起伏板各结构参数对消浪性能的影响;Fu 等^[10]采用基于黏性流体学的数值方法,研究了起伏板与固定板涡旋脱落过程的差异性,从涡旋耗能的角度阐述了起伏板的消浪机理。

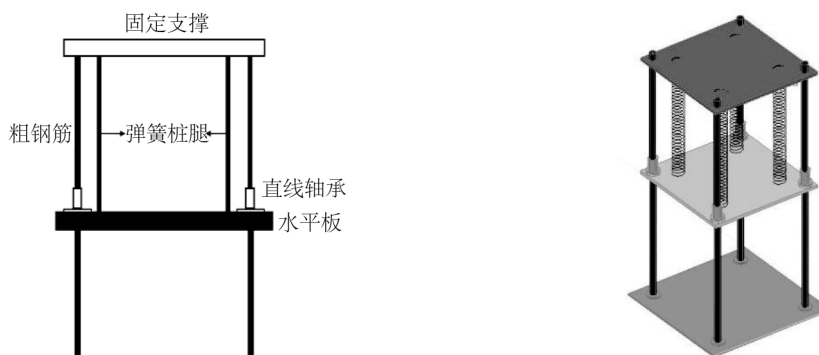


图 1 起伏板防波堤结构示意图

Fig. 1 Sketch of heaving plate breakwater

已有研究对起伏板防波堤潜深、板长、支撑刚度等结构参数均有过分析,对于弹簧支撑刚度的选取,如何确定该数值以适应特定入射波要素仍是结构设计的难点,前人研究往往通过大量数值模拟才能确定合适的刚度区间。本文旨在提出一种可快速得到特定入射波要素下起伏板最优支撑刚度的方法。

1 模型介绍

1.1 数值水槽控制方程

数值模型建立于二维笛卡尔坐标系,连续性方程以及动量方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (2)$$

其中, ρ 为流体密度, p 为质点压强, $\mathbf{F}$ 为作用于流体质点上的惯性力, μ 为动力黏滞系数, $\mathbf{u}$ 为质点的速度矢量。

流场的求解采用 CIP(constrained interpolation profile)方法^[11]对 Navier-Stokes 方程(N-S 方程)分步离散。对控制方程取空间导数后,通过构造插值多项式求解对流项,再使用中心差分方法求解扩散项,压力项利用松弛迭代法(SOR)求解,以上可完成一个时间步长的速度与压力场求解。自由面重构采用基于流体体积的 THINC/SW 方法^[12],采用双曲正切函数来构造水气两相界面。

1.2 起伏板运动数值模拟

流固耦合问题采用 IBM(immersed boundary method)方法,该方法可避免运算过程中复杂贴体网格的建立以及动、静界面滑移网格插值带来的误差。其核心在于引入一虚拟力 $\mathbf{L}$ 至 N-S 方程中以模拟固体对流体的影响。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} + \mathbf{L} \quad (3)$$

根据牛顿第二定律,波浪力作为外界激励,一部分效果体现为板的加速度变化,其余部分则提供板偏离平衡位置时伸缩弹簧的回复力,板的运动控制方程可表示为:

$$m \frac{d^2 z_c}{dt^2} + K(z_c - z_0) = \iint_A (-p \delta_{ik}) n_k dA - mg \quad (4)$$

其中, z_c 为任意时刻水平板质心的垂向坐标, z_0 代表板质心的初始高度,在该高度下弹簧回复力与板的水下重力平衡, p 为网格点压强, m 为板的质量, A 为板的外表面, n_k 为板表面第 k 个网格的法向量, g 为重力加速度, K 为板的支撑刚度。由于模型板厚较小,文中忽略黏性力垂向分量的影响。

1.3 起伏板运动理论模型

弹簧—阻尼—质量模型是一种求解机械振动的常见模型,若将波浪力视为正弦激励,起伏板在波浪下的运动可近似等效为该模型。在板的动力学方程(4)中,等号右端的积分项,水平板运动过程受的流体作用力可分为两部分:一部分为波浪扰动力 F_D ,即不受结构物运动干扰的入射波动水压力形成的流体动力,相当于水动板不动形成的绕射流体动力;另一部分为板起伏运动(板动水不动)而产生的辐射流体动力 $F_R^{[13]}$ 。其中, F_R 还可拆解为与结构物速度与加速度成正比的两项:

$$F_R = M\ddot{z}_c + C\dot{z}_c \quad (5)$$

式中:等式右端第一项代表因板的加速度变化引起的周围水质点加速度变化所需施加的额外力,因此 M 也称为附加质量,第二项存在于任何非理想流体中的振动系统,表征系统的能量耗散,一般认为正比于相对速度,系数 C 记为黏性阻尼。因此起伏板的动力学方程(4)可进一步写为式(6)的标准形式,等号右端代表波浪力的激励成分,左端代表了由结构自身、流体黏性引起的惯性力、黏滞力以及弹簧形变所需的回复力。

$$(m + M)\ddot{z}_c + C\dot{z}_c + K(z_c - z_0) = F_D \quad (6)$$

若把规则波作用下的激励 F_D 看作正弦加载,即:

$$F_D = F_0 \sin \omega_1 t \quad (7)$$

起伏板的运动则有式(8)的特解:

$$z_c(t) = B \cdot \sin(\omega_1 t - \varphi) \quad (8)$$

其中, B 为板的振幅, ω_1 为与波浪频率一致的激励频率, φ 为振动曲线 $z_c(t)$ 与波浪力曲线 $F_D(t)$ 的相位, B 、 φ 的值可根据板自身的动力参数以及外力参数写为:

$$\varphi = \arctan \frac{2n\omega_1}{\omega_n^2 - \omega_1^2}, B = \frac{q}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_1^2)^2 + 4n^2\omega_1^2}} \quad (9)$$

其中, n 、 q 、 ω_n 分别为表征阻尼大小、激励幅值以及回复力的相关参数。

$$2n = \frac{C}{m + M}, \quad \omega_n^2 = \frac{K}{m + M}, \quad q = \frac{F_0}{m + M} \quad (10)$$

2 数值模型验证

参考 Hayatdavoodi 等^[14]开展的椭圆余弦波与水平板相互作用的试验,重点对结构的受力进行验证,有关模型水动力的验证部分可参考 Fu 等^[10]的工作。验证工况水平板安置在距离造波板平衡位置 2.62 m,浪高测点安置在板前以及板后两倍板宽位置,板宽取值 0.305 m,平衡位置在 0.6 倍水深位置处,水深 0.071 m,波高 $H/h=0.3$,入射波长选取 1.9 m。本文网格设置采取波长方向设置 100 个网格,波高方向 20 个网格,对结构物附近再进行局部加密。

图 2 为数值模拟的测点浪高历时以及板受波浪荷载与试验结果的对照,其中,板受波浪荷载通过式(11)进行无量纲化, t_p 为水平板厚度, L_p 为迎浪面宽度, F_x 、 F_y 表示水平板受到的波浪力。

$$\bar{F}_x = \frac{F_x}{\rho g h t_p L_p}, \quad \bar{F}_y = \frac{F_y}{\rho g h^2 L_p} \quad (11)$$

从图 2(a)、(b)可观察到,造波稳定后浪高测点信息与试验结果吻合良好,说明文中数值模型可模拟具有较强非线性的长波,结构物的相对宽度 B/L 较小,波浪传播经过结构物后波高没有发生较大的衰减。

图2(c)、(d)为波浪力的对照结果,水平荷载拟合结果较好,由于板完全浸没在水下,波浪荷载的周期性特征明显,椭圆余弦波又具有较强非线性,体现为波峰陡峭波谷平缓,因此荷载的变化存在快速变化时段以及较长的平稳时段。垂向荷载与试验存在一定的偏差但整体接近,可准确模拟荷载的峰值,而波浪与结构物作用时的浅水变形、波浪破碎等过程较难模拟是形成差异的主要原因。

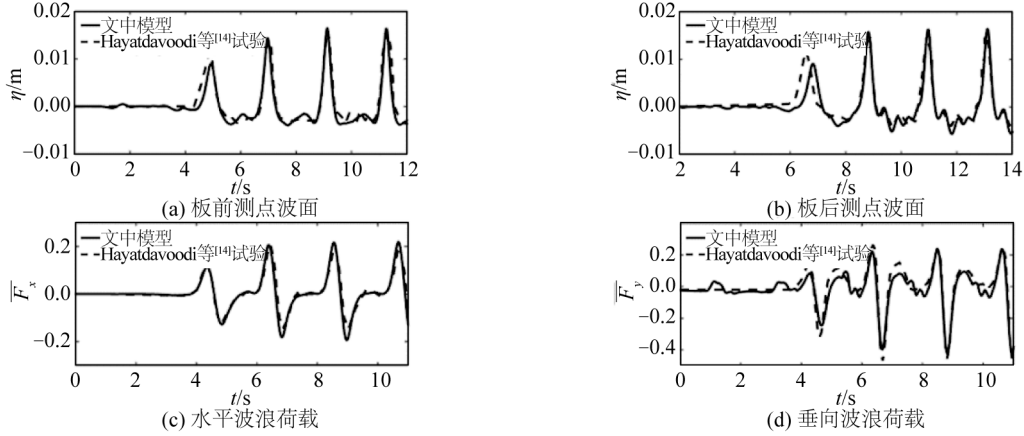


图2 浪高与波浪荷载与试验结果对比

Fig. 2 Comparison of wave surface and wave loads with experiment

3 模拟结果

3.1 支撑刚度对消浪性能的影响

数值水槽模型设置如图3所示。水槽水深 $h=0.3$ m,造波方法选取速度边界法,尾端设置消波区。水平板平衡位置的相对潜深为 $z/h=0.3$,设置在水槽中心偏右以减少二次反射波的影响,板宽与波长的比值为 $B/L=0.35$,板厚 0.01 m, K 为弹簧刚度, C 为等效黏性阻尼。波高 H 设置为 0.06 m。 G_1 、 G_2 为两处数值浪高仪用于分离入射波与反射波,距离 0.4 m,约为板前半波长位置处,分离方法参考Goda和Suzuki^[15]研究, G_3 浪高仪位置为板后 $0.2L$ 处。

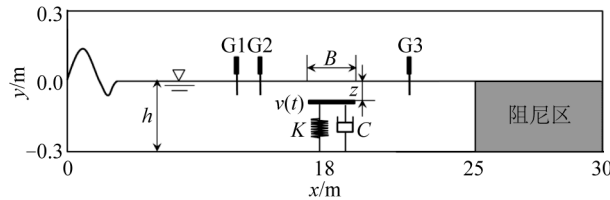


图3 数值水槽示意

Fig 3 Schematic diagram of numerical water tank

为量化起伏板对波浪的消能作用,采用总波能流量计算透反射系数,通过傅里叶分析得到波浪的频谱后,积分各频率下的波能流量,可得到入射波、反射波以及透射波的总波能流量 P_I 、 P_R 、 P_T 。总波能流量以及透反射系数定义为:

$$P_I = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} \rho g (A_I^{(n)})^2 c_g^{(n)}, P_R = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} \rho g (A_R^{(n)})^2 c_g^{(n)}, P_T = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} \rho g (A_T^{(n)})^2 c_g^{(n)} \quad (12)$$

$$C_T = \sqrt{P_T/P_I}, C_R = \sqrt{P_R/P_I} \quad (13)$$

其中, $A_I^{(n)}$ 、 $A_R^{(n)}$ 、 $A_T^{(n)}$ 分别为第 n 阶入射波、反射波、透射波的振幅, $c_g^{(n)}$ 为第 n 阶波的波能传播速度。

选取 $T=1$ s的规则波作为入射波,保持水深、波高不变,以支撑刚度 K 为变量,保持板密度($\rho_s=1.5$ g/cm³),质量 $m=\rho_s B D$,板厚 D 以及相对板宽 B/L 一定。模拟总时长为 30 s,数值水槽各参数具体设置见表1。

起伏板透射系数 C_T 和反射系数 C_R 随弹簧刚度 K 变化曲线如图4所示,可以观察到,支撑刚度是影响起伏板消浪能力的重要因素,透射系数随支撑刚度的变化存在一极小值。当 K 值较小或过大时,板的消浪性能均不能达到最优^[7-9]。

表1 工况参数
Tab. 1 Properties of cases

参数	T/s	H/h	z/h	D/m	B/L	$K/(kN \cdot m^{-1})$
数值	1	0.2	0.3	0.01	0.35	[1, 100]

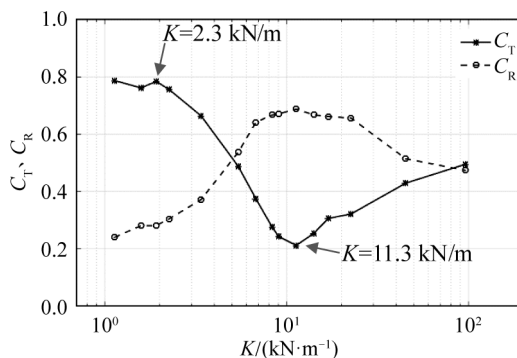


图4 C_T, C_R 随弹簧刚度 K 变化曲线 ($T=1$ s)

Fig. 4 The variation of C_T and C_R with spring stiffness at $T=1$ s

图5给出了静水条件下,起伏板一个周期内的强迫振动位移以及产生的辐射波波面,目的在于说明板的强迫振动可产生与行进波同向的辐射波,若该辐射波与目标行进波有着完全相反的相位(水槽中某一位置某时刻的行进波显示为波峰而辐射波为波谷),波波叠加后,辐射波可消耗行进波的能量。板的强迫振动振幅 $A=0.015$ m,图5(a)~(d)分别为水平板一个振动周期内 $t=0, 1/4T, 1/2T, 3/4T$ 时刻位置,其中,图5(a)~(c)为水平板持续向上运动,水平板上方水质点被抬高形成隆起,当达到最高点时(图5(c)),板上方被抬升的水体向两侧流动,并在图5(d)中伴随板的向下位移形成向两侧传播的行进波波峰。图5的过程可概括为,水平板向上运动过程将形成向两侧传播的行进波波峰,向下运动则形成波谷。

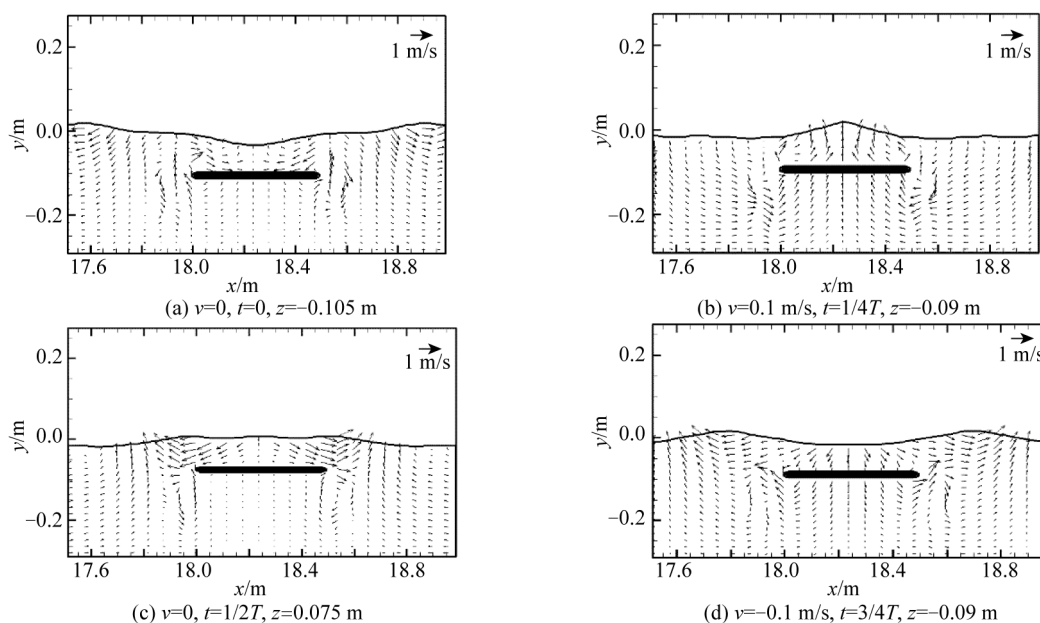


图5 水平板强迫振动引起的波面变化(无入射波)

Fig. 5 The surface modified by the heaving motion of a horizontal plate (No incident waves)

图6作为实际模拟结果,不同于图5的地方在于,图6(a)~(c)、图6(d)~(e)中板的振动均由行进波引起,区别于各自的支撑刚度不同,导致板的振动产生不同辐射波相位,进而将引起消浪能力的优劣之别。选取 $K=11.3$ kN/m(对应透射系数0.21)以及 2.3 kN/m(对应透射系数0.66)两组支撑刚度工况进行分析,由于板运动相位的差异,图6(a)~(c)中板的运动响应超前于图6(d)~(f),即水平板提前了 0.13 s 到达简谐振动的特征位置。在同为向下运动的半个周期内,图6(a)~(c)中的板使得行进的波峰被“抹平”;而图6(d)~(f)中板的上

方却对应着波谷段的经过,板的运动并不能造成图 6(a)~(c)中“抹平”波面的效果。在图 6(a)所示时刻,板位于最高点时波峰已行进至板中央物前 0.34 m 位置处,约为 0.25 倍波长位置。当波峰继续传播经过结构物,板向下运动将在半个周期内持续对波峰水质点的向上运动起抑制效果,波峰被“抹平”。因此,使板的位移与板前 0.25L 位置的浪高曲线保持同频,可使得行进波能量被起伏运动大幅削弱,该刚度即为起伏板理想的设计刚度。

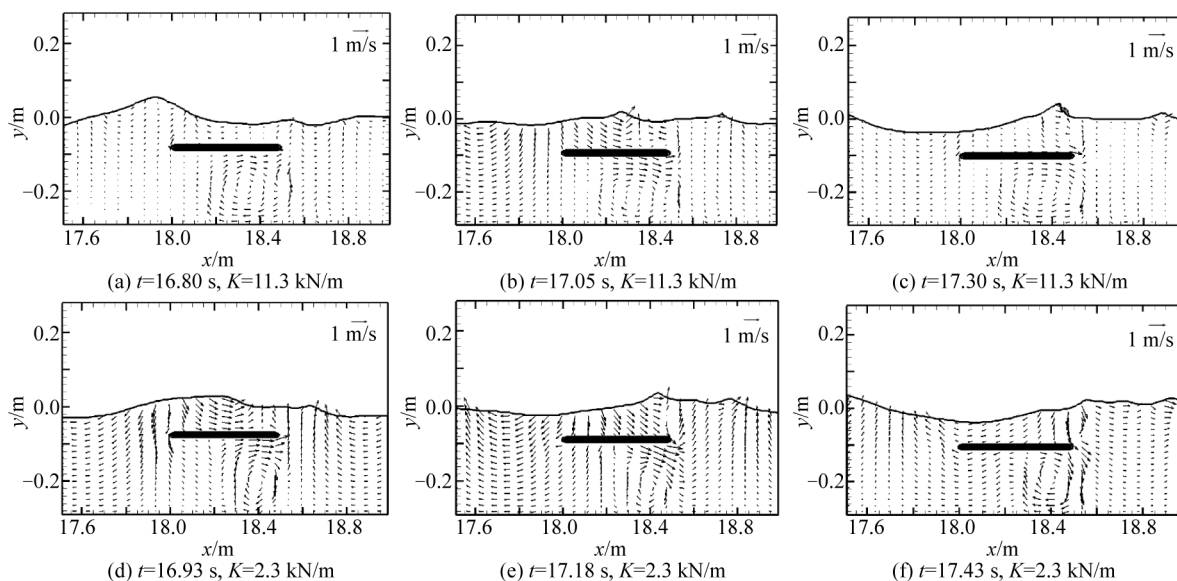


图 6 两种刚度条件下起伏运动对行进波的影响

Fig. 6 Different wave patterns affected by heaving motions under two supporting stiffnesses

3.2 最优支撑刚度的快速获得

根据 1.3 中提出的理论模型,本小节首先构建起伏板的运动方程。式(6)中的未知量仅为 M 与 C ,可通过代入一组 $(\ddot{z}_c, \dot{z}_c, F_D - Kz_c)$ 的时间序列后用 MATLAB 拟合工具箱中的最小二乘法计算得到。时间序列选取起伏板 15~21 s 的数据,原因为该段时间入射波已相对稳定,且二次反射波尚未到达结构物,数据具体值见图 7,采样频率 100 Hz,共 601 组。在用最小二乘法计算得到 M 与 C 的过程中, K 可选取为任意刚度值,原因在于 M 与 C 只取决于结构物与流体的性质,支撑刚度 K 引起的回复力与前者引起的惯性力、黏性力相互独立,因此本文选取为 2.3 kN/m。图 8 为水平板等效受迫振动方程的拟合结果,散点代表数模中 15~21 s 板运动过程的加速度、速度以及合外力 $(\ddot{z}_c, \dot{z}_c, F_D - Kz_c)$ 对应坐标空间的位置,斜面为拟合得到的式(6)表示的面域。由拟合结果来看,散点近似落在等效振动方程所表示的面域上,拟合度 R^2 可达 0.98,因此起伏板的运动可通过式(6)进行理论求解。

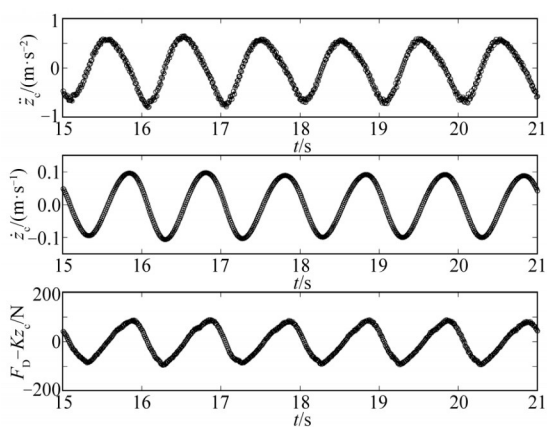


图 7 15~21 s 板的加速度、速度及合外力序列

Fig. 7 Acceleration, velocity and combined force array of the plate during 15~21 s

在验证起伏板的运动满足弹簧—阻尼—质量模型的基础上,可采用式(9)推导最优支撑刚度的理论值。式(9)建立了结构运动特征与支撑刚度的联系,而起伏板具有最优消浪效果的运动特征已在 3.1 小节中进行了分析,即板的运动曲线与板中央前 0.25L 位置(记为 x_1)的浪高曲线具有等同相位,记为 $z_c = A \cdot \cos(kx_1 - \omega t + \varphi)$ 。将以上运动曲线与波浪力 F_D 的相位 φ_1 代入式(9)后即可得到起伏板具有最优消浪效果的刚度推导值 K^* 。以上推导的详细流程见图 9。

为验证通过以上理论方法得到 K^* 具有可行性,保持相对板宽、波高、潜深等参数不变,选取两组周期更高的入射波 $T=1.2, 1.5$ s 作为新的入射条件。而根据表征浅水波非线性大小的无量纲参数 Ursell 数的定义 U_r ,

$=L^2H/h^3$,可知选取更高周期后,波形的非线性特征也将更明显。在新的入射波周期下,采用遍历方法得到的起伏板各支撑刚度所对应的透射系数结果见图10。同时,通过选取一任意值支撑刚度 K (这里选取为10 kN/m),采用图8中的拟合方法重新得到起伏板附加质量 M 与黏性阻尼 C 后,可通过板的理论最优运动曲线的相位值以及式(9)求解 K^* 。各入射波周期下板的附加质量 M 、黏性阻尼 C ,相位 φ_1 ,最优刚度理论结果 K^* 、最优刚度遍历结果 K' 以及二者相对误差的统计值见表2。

从图10可以得到,随着波周期增长,起伏板达到最小透射系数对应的支撑刚度增大,从表2结果可知, K^* 与实际最优支撑刚度 K' 接近,但随着 T 的增大, K^* 与实际最优支撑刚度的偏差有一定增大,其原因在于起伏板的透射系数是由振动相位与振幅综合决定,尽管相位是决定结构物消浪性能主导因素,但随着刚度增大,板的振幅也会相应减小,板运动所产生的辐射波的影响减弱。但综合来看,根据理论公式推得的最优支撑刚度 K^* 与数模遍历最优值 K' 接近,可使起伏板透射系数小于0.3。

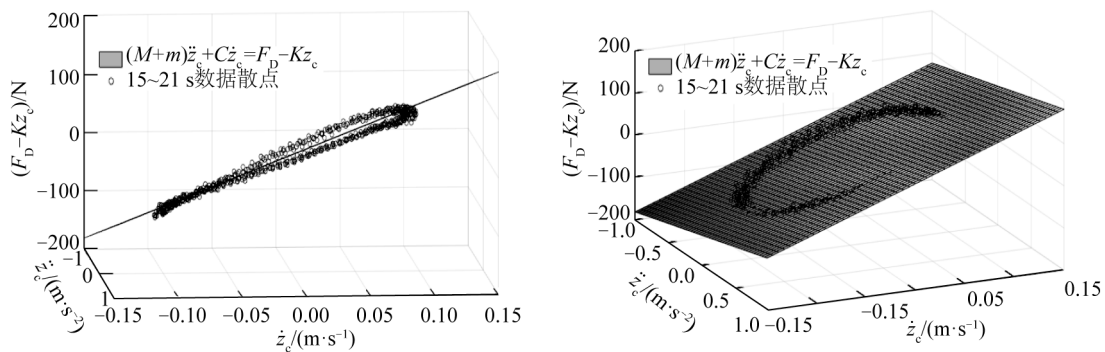


图8 水平板等效振动方程拟合结果($T=1$ s, $K=2.3$ kN/m)

Fig. 8 Curve fitting of equivalent vibration equation of horizontal plate ($T=1$ s, $K=2.3$ kN/m)

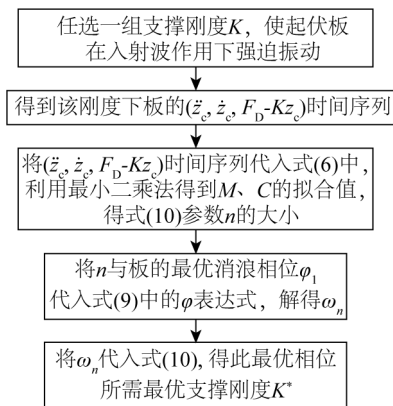


图9 利用最优相位 φ_1 反推最优支撑刚度 K^* 流程

Fig. 9 Flow chart of solving optimal support stiffness K^* using optimal phase φ_1

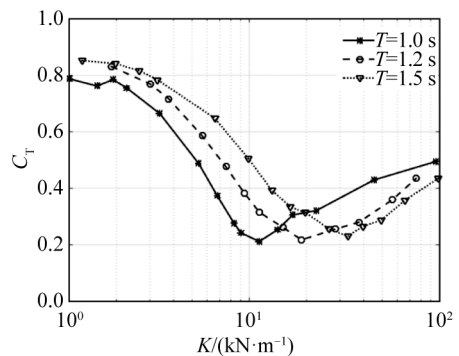


图10 C_T 随支撑刚度 K 变化曲线

Fig. 10 The variation of transmission coefficient C_T with support stiffness K

表2 误差统计表
Tab. 2 Error statistics

入射波周期 T/s	参考点位置	结构物附加质量 M/kg	黏性阻尼 $C/(kg \cdot s^{-1})$	相位角 φ_1	最优刚度推导结果 $K^*/(kN \cdot m^{-1})$	最优刚度遍历结果 $K'/(kN \cdot m^{-1})$	误差/%
1.0	板前0.25L	45.7	862.2	0.537	11.3	11.9	5.0
1.2	板前0.25L	61.6	1 395.4	0.439	17.5	18.8	6.9
1.5	板前0.25L	115.7	2 252.0	0.372	26.4	32.9	19.7

4 结 语

基于黏性流理论建立数值波浪水槽,开展了不同支撑刚度下起伏板与规则波的相互作用研究,分析了

支撑刚度对起伏板消浪性能的影响,建立了起伏板的等效弹簧—阻尼—质量模型,主要结论如下:

1)对于规则波入射情况,起伏板透射系数随支撑刚度先减小再增大,在最小透射系数对应刚度下,板处于振动最高点时行进波峰位于板中点前 $0.25L$ 位置,此时起伏板具有最优消浪效果,表现为波峰经过板上方位置将受到水平板向下速度的影响,波峰被“抹平”,大部分波能被反射或耗散。

2)弹簧—阻尼—质量模型可作为起伏板运动的理论模型,通过文中方法构建运动方程可反推起伏板的最优支撑刚度。该理论方法只需使用单组工况建立模型,相比用试验或数模的遍历方法进行支撑刚度设计可减少时间成本。

3)支撑刚度对起伏板消浪性能的影响同时体现在相位与振幅两个方面,随着入射波周期的增大,需综合参考相位与振幅以确定起伏板的最优支撑刚度。

参考文献:

- [1] 俞聿修. 防波堤技术的新进展[J]. 中国港湾建设, 1999(1): 1-7. (YU Y X. A new progress in breakwater technology[J]. China Harbour Engineering, 1999(1): 1-7. (in Chinese))
- [2] CHEONG H F, PATARAPANICH M. Reflection and transmission of random waves by a horizontal double-plate breakwater [J]. Coastal Engineering, 1992, 18(1/2): 63-82.
- [3] 王国玉, 王永学, 李广伟. 多层水平板透空式防波堤消浪性能实验研究[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(6): 865-870. (WANG G Y, WANG Y X, LI G W. Experimental study of wave-damping performance of multiple-layer breakwater[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(6): 865-870. (in Chinese))
- [4] YU X, TOGASHI H. Combined diffraction and transmission of water waves around a porous breakwater gap [C]//Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'96). ASCE, 1996: 2063-2076.
- [5] WU Y, YE H C, HSIAO S. Three-dimensional numerical simulation on the interaction of solitary waves and porous breakwaters [J]. Coastal Engineering, 2014, 85(1): 12-29.
- [6] 宋子路, 任冰, 孙见锋, 等. 弹性支撑水平板上的波浪冲击压力试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2014, 29(4): 435-443. (SONG Z L, REN B, SUN J F, et al. Experimental study of the wave impact pressure on horizontal deck with elastic braces[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(4): 435-443. (in Chinese))
- [7] LIU C, HUANG Z, CHEN W. A numerical study of a submerged horizontal heaving plate as a breakwater [J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(4): 917-930.
- [8] HE M, XU W, GAO X, et al. SPH simulation of wave scattering by a heaving submerged horizontal plate [J]. International Journal of Ocean & Coastal Engineering, 2018, 1(2): 1840004.
- [9] 王贤梦, 赵西增, 付丁. 波浪与起伏水平板防波堤相互作用数值模拟[J]. 海洋工程, 2019, 37(3): 61-68. (WANG X M, ZHAO X Z, FU D. Numerical simulation of water wave interaction with a floating plate breakwater [J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(3): 61-68. (in Chinese))
- [10] FU D, ZHAO X Z, WANG S. Numerical study on the wave dissipating performance of a submerged heaving plate breakwater [J]. Ocean Engineering, 2021(219): 108310.
- [11] 叶洲腾. 强非线性自由面运动的CFD模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. (YE Z T. Numerical modeling of strongly nonlinear free surface flow[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese))
- [12] XIAO F, II S, CHEN C. Revisit to the THINC scheme: A simple algebraic VOF algorithm [J]. Journal of Computational Physics, 2011, 230(19): 7086-7092.
- [13] 潘晓明. 船舶原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012. (PAN X M. Ship manoeuvring and seakeeping[M]. Beijing: China Communication Press, 2012. (in Chinese))
- [14] HAYATDAVOODI M, SEIFFERT B, ERTEKIN R C. Experiments and calculations of cnoidal wave loads on a flat plate in shallow-water [J]. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2015, 1(1): 77-99.
- [15] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments [J]. Plos One, 1976, 4(9): 73.