

斜向入射波与反射波的分离

孙昭晨 王利生

(大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116023)

摘 要 提出了一种分离斜向入射波和反射波的方法, 波浪可以是规则波、不规则波, 波向可以任意. 在一定的限制条件下, 采用两点浪高仪的波浪信号就可将斜向入射波和反射波分离.

关键词 斜向入射波 反射波 分离

1 引言

在海岸水域, 特别是在离岸和海岸结构物之前, 波浪通常是入射波和反射波的叠加. 根据结构的类型, 入射波能部分消耗于结构物上或结构物内, 部分传过或越过结构, 部分由结构引起反射, 但通常结构物的反射系数未知, 难于获得入射波高值. 在港池三维模型试验中也经常遇到此类问题. 因此有必要提出一种能将记录到的波浪信号分离出入射波和反射波的方法.

现在有多种分离入射波的方法, 但通常均假定入射波的波向垂直于结构物. Thornton 和 Calhoun^[1]、Morden 和 Bichy^[2]、Goda 和 Suzuki^[3]提出了利用布置于结构物垂线方向上的两个浪高仪分离正向入射波和反射波的方法. 由于方法本身的限制, 当两个浪高仪之间的间距为半个波长时, 不能应用此方法. Mansard 和 Funke^[4]采用三点浪高仪和最小二乘法克服了两点法的弊端, Zelt 和 Skjelbreia^[5]又将此法推广到任意个浪高仪阵列. 为了将结构物之前的随机多向入射波和反射波分离, Dickson 等^[6]提出了波谱的方法, 不再假定入射波垂直于结构物, 但假定小角度入射.

本文提出了一种将单向规则或不规则入射波和反射波分离的方法, 在结构物之前布置两个浪高仪, 几何位置相对任意, 同样不再假定入射波垂直于结构物, 波浪入射角几乎可从 -90° 到 $+90^\circ$. 当入射波为正向时, Goda 提出的两点方法是本文方法的一个特例, 为了验证方法的可靠性, 在波浪槽和波浪池中进行了二维和三维模型试验, 结果表明, 本文方法可以较好地入射波和反射波分离, 并且能给出准确的结构反射系数.

2 数学方法

在结构物之前, 布置两个浪高仪, 其水平坐标为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 如图 1 所示, 结构物可以是防波堤、直墙、沙坝或陡峭的海岸. 对规则波, 假定入射波可以表示为

本文于 1997-04-10 收到, 修改稿于 1998-07-29 收到.

第一作者简介: 孙昭晨, 男, 38 岁, 教授, 博士, 从事海岸和近海工程研究.

$$\eta_i = a_i \cos(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t + \psi_i), \quad (1)$$

假定反射角等于入射角, 则反射波可以表示为

$$\eta_r = a_r \cos(-kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t + \psi_r), \quad (2)$$

式中, a_i 和 a_r 分别是入射波和反射波的波幅; ψ_i 和 ψ_r 分别是入射波和反射波的相位角; k 是波数; θ 是入射波与 x 轴之间的夹角; ω 是波浪圆频率. 将入射波和反射波叠加可得总波动为

$$\eta = \eta_i + \eta_r = a_i \cos(\varphi_i - \omega t) + a_r \cos(\varphi_r - \omega t), \quad (3)$$

式中, $\varphi_i = kx \cos \theta + ky \sin \theta + \psi_i$, $\varphi_r = -kx \cos \theta + ky \sin \theta + \psi_r$.

在第一浪高仪点, 总波动为

$$\eta_1 = a_i \cos(\varphi_{i1} - \omega t) + a_r \cos(\varphi_{r1} - \omega t) = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t, \quad (4)$$

在第二个浪高仪点, 总波动为

$$\eta_2 = a_i \cos(\varphi_{i2} - \omega t) + a_r \cos(\varphi_{r2} - \omega t) = A_2 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t, \quad (5)$$

式中,

$$A_1 = a_i \cos \varphi_{i1} + a_r \cos \varphi_{r1}; \quad (6)$$

$$B_1 = a_i \sin \varphi_{i1} + a_r \sin \varphi_{r1}; \quad (7)$$

$$A_2 = a_i \cos \varphi_{i2} + a_r \cos \varphi_{r2}; \quad (8)$$

$$B_2 = a_i \sin \varphi_{i2} + a_r \sin \varphi_{r2}; \quad (9)$$

$$\varphi_{i1} = kx_1 \cos \theta + ky_1 \sin \theta + \psi_i; \varphi_{r1} = -kx_1 \cos \theta + ky_1 \sin \theta + \psi_r,$$

$$\varphi_{i2} = kx_2 \cos \theta + ky_2 \sin \theta + \psi_i; \varphi_{r2} = -kx_2 \cos \theta + ky_2 \sin \theta + \psi_r.$$

如果在第一和第二个浪高仪处波浪数据已知, 则方程 (4) 和 (5) 中的系数 A_1 、 B_1 、 A_2 和 B_2 可以通过快速傅里叶分析得到, 然后求解方程 (6) 到 (9), 可以得到波幅和相角 a_i 、 a_r 、 ψ_i 和 ψ_r . a_i 和 a_r 可以通过下列关系得到:

$$a_i = \frac{1}{2} \frac{1}{\left| \sin[(x_1 - x_2)k \cos \theta] \right|} \left[(B_1 \cos D_1 - A_1 \sin D_1 - B_2 \cos D_2 + A_2 \sin D_2)^2 + (A_1 \cos D_1 + B_1 \sin D_1 - A_2 \cos D_2 - B_2 \sin D_2)^2 \right]^{1/2}, \quad (10)$$

$$a_r = \frac{1}{2} \frac{1}{\left| \sin[(x_1 - x_2)k \cos \theta] \right|} \left[(A_1 \sin C_1 - B_1 \cos C_1 - A_2 \sin C_2 + B_2 \cos C_2)^2 + (A_1 \cos C_1 + B_1 \sin C_1 - A_2 \cos C_2 - B_2 \sin C_2)^2 \right]^{1/2}, \quad (11)$$

式中,

$$C_1 = kx_1 \cos \theta + ky_1 \sin \theta,$$

$$D_1 = -kx_1 \cos \theta + ky_1 \sin \theta,$$

$$C_2 = kx_2 \cos \theta + ky_2 \sin \theta,$$

$$D_2 = -kx_2 \cos \theta + ky_2 \sin \theta.$$

反射系数可通过下列公式确定:

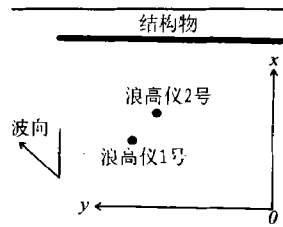


图1 坐标示意图

$$k_r = \frac{a_r}{a_i}. \quad (12)$$

在自然海洋环境中, 波浪大多为不规则的, 记录到的波浪数据具有明显的随机性, 有必要提出一种能将不规则入射波和反射波分离的方法. 通常认为随机的波面运动为高斯正态过程, 其平均值为 0, 我们可以假定不规则入射波由许多具有不同频率的规则波组成, 不规则入射波和不规则反射波可表示为

$$\eta_i = \sum_{m=1}^M a_{im} \cos(k_m x \cos\theta + k_m y \sin\theta - \omega_m t + \varphi_{im}), \quad (13)$$

$$\eta_r = \sum_{m=1}^M a_{rm} \cos(-k_m x \cos\theta + k_m y \sin\theta - \omega_m t + \varphi_{rm}), \quad (14)$$

式中, a_{im} 和 a_{rm} 分别是入射波和反射波组成波的波幅; M 是组成波的个数; k_m 和 ω_m 是组成波的波数和圆频率, 并满足色散关系:

$$\omega_m^2 = k_m g \tanh(k_m d),$$

其中 g 是重力加速度; d 是水深. 在两个测波点, 总波动可表示为

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \sum_{m=1}^M a_{im} \cos(\varphi_{i1m} - \omega_m t) + a_{rm} \cos(\varphi_{r1m} - \omega_m t) \\ &= \sum_{m=1}^M A_{1m} \cos\omega_m t + B_{1m} \sin\omega_m t, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \eta_2 &= \sum_{m=1}^M a_{im} \cos(\varphi_{i2m} - \omega_m t) + a_{rm} \cos(\varphi_{r2m} - \omega_m t) \\ &= \sum_{m=1}^M A_{2m} \cos\omega_m t + B_{2m} \sin\omega_m t, \end{aligned} \quad (16)$$

式中,

$$A_{1m} = a_{im} \cos\varphi_{i1m} + a_{rm} \cos\varphi_{r1m}, \quad (17)$$

$$B_{1m} = a_{im} \sin\varphi_{i1m} + a_{rm} \sin\varphi_{r1m}, \quad (18)$$

$$A_{2m} = a_{im} \cos\varphi_{i2m} + a_{rm} \cos\varphi_{r2m}, \quad (19)$$

$$B_{2m} = a_{im} \sin\varphi_{i2m} + a_{rm} \sin\varphi_{r2m}, \quad (20)$$

$$\varphi_{i1m} = k_m x_1 \cos\theta + k_m y_1 \sin\theta + \psi_{im}, \quad \varphi_{r1m} = -k_m x_1 \cos\theta + k_m y_1 \sin\theta + \psi_{rm},$$

$$\varphi_{i2m} = k_m x_2 \cos\theta + k_m y_2 \sin\theta + \psi_{im}, \quad \varphi_{r2m} = -k_m x_2 \cos\theta + k_m y_2 \sin\theta + \psi_{rm}.$$

如果两个测波点处的波浪数据已知, 则系数 A_{1m} 、 B_{1m} 、 A_{2m} 、 B_{2m} 同样可以通过快速傅里叶分析得到, 然后求解方程式 (16) ~ (19), 我们可得到入射波和反射波组成波的波幅:

$$a_{im} = \frac{1}{2} \frac{1}{\left| \sin[(x_1 - x_2)k_m \cos\theta] \right|} \left[(B_{1m} \cos D_{1m} - A_{1m} \sin D_{1m} - B_{2m} \cos D_{2m} + A_{2m} \sin D_{2m})^2 + (A_{1m} \cos D_{1m} + B_{1m} \sin D_{1m} - A_{2m} \cos D_{2m} - B_{2m} \sin D_{2m})^2 \right]^{1/2}, \quad (21)$$

$$a_{rm} = \frac{1}{2} \frac{1}{\left| \sin[(x_1 - x_2)k_m \cos\theta] \right|} \left[(A_{1m} \sin C_{1m} - B_{1m} \cos C_{1m} - A_{2m} \sin C_{2m} + B_{2m} \cos C_{2m})^2 + (A_{1m} \cos C_{1m} + B_{1m} \sin C_{1m} - A_{2m} \cos C_{2m} - B_{2m} \sin C_{2m})^2 \right]^{1/2}, \quad (22)$$

式中,

$$\begin{aligned} C_{1m} &= k_m x_1 \cos \theta + k_m y_1 \sin \theta, \\ D_{1m} &= -k_m x_1 \cos \theta + k_m y_1 \sin \theta, \\ C_{2m} &= k_m x_2 \cos \theta + k_m y_2 \sin \theta, \\ D_{2m} &= -k_m x_2 \cos \theta + k_m y_2 \sin \theta. \end{aligned}$$

结构物的反射系数为

$$k_r = \frac{A_r}{A_i}, \quad (23)$$

式中,

$$A_i = \left[\sum_{m=1}^M a_{im}^2 \right]^{0.5}, \quad (24)$$

$$A_r = \left[\sum_{m=1}^M a_{rm}^2 \right]^{0.5}. \quad (25)$$

如果波浪垂直入射,两个浪高仪布置在结构物的垂线上,则本文方法同 Goda 的方法完全一致.在公式(10)、(11)和公式(21)、(22)中,入射波和反射波波幅公式的分母中出现 $|\sin[(x_1 - x_2)k \cos \theta]|$ 和 $|\sin[(x_1 - x_2)k_m \cos \theta]|$,当 $(x_1 - x_2)k_m \cos \theta = n\pi$ 时,即两个浪高仪的连线平行于结构物,或波浪入射角等于 $\pm 90^\circ$,或两个浪高仪在 x 方向的距离等于 x 方向的波长的一半,在这些条件下,两点波高信号没有本质差别,只有 180° 的相位差,此时利用此法不能将入射波和反射波进行分离.当 $|\sin[(x_1 - x_2)k \cos \theta]|$ 或 $|\sin[(x_1 - x_2)k_m \cos \theta]| \ll 1$ 时,将导致推算出的入射波幅、反射波幅以及反射系数误差太大.造成此种结果的原因一是两个浪高仪之间的间距过小,二是反射角过大.对于规则波,两个浪高仪之间的间距应大于半个波长,小于一个波长.对于不规则波,两个浪高仪之间的间距应大于平均周期对应的半个波长,小于平均周期对应的波长.当入射波遇到结构物后,除了形成反射波外,由于局部扰动,在结构物前还将形成非传播性的局部波,此局部波在距结构物 1.5 倍距离时衰减 90% 以上,本文方法不能消除局部波,因此,浪高仪距结构物应有 1.5 倍波长的距离.

只要避免上述的限制条件,此方法也可用于谱分析.入射波和反射波的谱密度可通过下列公式得到:

$$s_i(f_m) = \sum_{j=-p}^p H(j) \frac{0.5 a_{i(m-j)}^2}{\Delta f}, \quad (26)$$

$$s_r(f_m) = \sum_{j=-p}^p H(j) \frac{0.5 a_{r(m-j)}^2}{\Delta f}, \quad (27)$$

$$\sum_{j=-p}^p H(j) = 1, \quad (28)$$

式中, $H(j)$ 是权函数; Δf 是频率间隔; s_i 和 s_r 分别是入射波和反射波的谱密度.

3 物理模型试验

为了验证本文方法的可靠性,在波浪池内进行了三维物理模型试验,试验布置如图 2 所示.在三维模型试验中布置了五个浪高仪,其中水平坐标分别为 (1.24, 0.49)、(0.70, 0.47)、

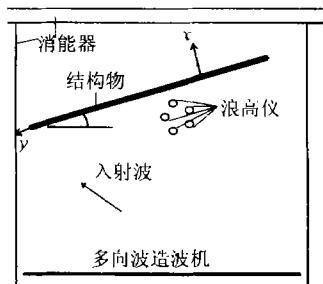


图2 三维模型试验布置

(0.50, 0.00)、(-0.97, -0.33)和(1.42, -0.01), 单位为m, 水深为0.4 m, 结构物为一直墙, 规则波波浪条件如表1所示。

对不规则波, 试验采用了JONSWAP谱。不规则波波浪条件如表2所示。在三维模型试验中, 首先不安放结构物, 此时反射系数应该接近于0。此种情况下, 仅进行了规则波试验, 计算得到的平均反射系数为0.08, 非常接近于无反射条件下的结果。对不规则波, 计算的反射系数如表2所示。尽管结构物相同, 但不规则波的反射系数小于规则波的反射系数。

表1 规则波波浪条件

波高 H/m	周期 T/s	波向 $\theta/(^\circ)$	反射系数 k_r
0.05	0.92	315	0.93
0.05	1.20	315	0.94
0.05	0.92	330	0.97
0.05	1.20	330	0.91

表2 不规则波波浪条件

有效波高 H/m	平均周期 T/s	波向 $\theta/(^\circ)$	γ	反射系数 k_r
0.05	1.20	315	1	0.85
0.05	1.20	330	1	0.86
0.05	0.92	315	4	0.86
0.05	1.20	315	4	0.88
0.05	0.92	330	4	0.90
0.05	1.20	330	4	0.86

图3为不规则波入射波谱、合成波谱及反射波谱的分析结果。试验条件为JONSWAP谱形, 有效波高为0.04 m, 谱峰周期为0.917 s, 水深为0.5 m, 波浪入射角为 315° 。本文方法与合田良实方法类似, 也出现有效分离频率范围, 对不规则波的低频和低频组成成分分离精度很低。这可通过两种方法加以弥补, 一是在谱分析时设置高频和低频截止频率, 人为滤掉高频和低频波组成成分, 二是在选择权函数 $H(j)$ 时, 使其在高频和低频时尽可能小。

4 工程应用

为了维持港内的泊稳条件, 码头水工结构应尽可能采用消能结构形式, 使反射系数尽可能低。在工程和物理模型试验中, 经常需要确定此类结构的反射系数。为了确定图4所示结构的反射系数, 在波浪槽内进行了二维模型试验。试验中采用了五种不同的结构形式, 基本上由五层组成, 下部四层为重力式方块, 顶层为预制的带有空腔的沉箱。试验中采用了Bretschneider谱。通过试验发现, 反射系数随沉箱空腔尺度而变。图5为试验结果, 图中 L_p 为谱峰周期对应的波长。采用适当的空腔尺度, 可保证反射系数较低。

5 讨论和结论

在反射物前布置两个浪高仪,其水平坐标要受到一定限制.当入射波垂直入射,两点浪高仪的连线垂直于结构物时,Goda提出的方法仅是本文方法的一个特例.模型试验结果表明,该方法能够将斜向入射波和反射波分离,并且能够给出较准确的结构反射系数.

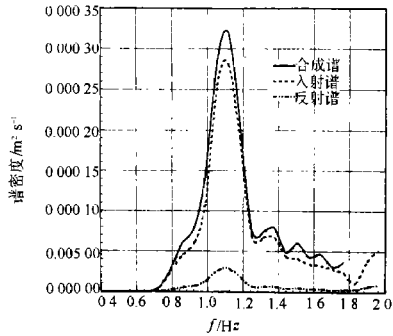


图3 不规则波入射波谱、合成波谱和反射波谱

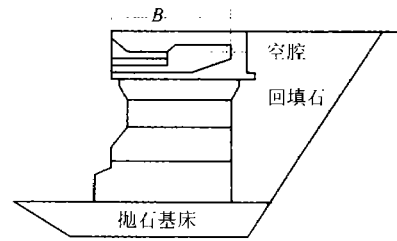


图4 消能式码头示意图

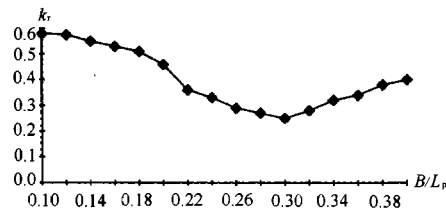


图5 反射系数 k_r 与空腔尺度 B/L_p 的关系

参考文献

- 1 Thornton E B, Calhoun R J. Spectral resolution of breakwater reflected waves. J. Waterway, Harbor, and Coastal Eng. Div., ASCE, 1998, (4): 443 ~ 460
- 2 Morden, D B, Richey E P, Christensen D R. Decomposition of coexisting random wave energy. In: Proc. 15th Int. Coast. Engrg. Conf., New York: ASCE, 1976, 846 ~ 865
- 3 Goda Y, Suzuki Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. In: Proc., 15th Int. Coast. Engrg. Conf., New York: ASCE, 1976, 828 ~ 845
- 4 Mansard E P D, Funke E R. The measurement of incident and reflected spectra using a least square method. In: Proc. 17th Int. Coast. Engrg. Conf., New York: ASCE, 1980, 154 ~ 172
- 5 Zelt J A, Skjelbreia J E. Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges. In: Proc. 23th Int. Coast. Engrg. Conf., New York: ASCE, 1992, 777 ~ 789
- 6 Dickson W S, Herbers T H C, Thornton E B. Wave reflection from breakwater. J. Waterway, Harb., and Coastal Eng. Div., ASCE, 1995, 121 (5): 262 ~ 268

Decomposition of oblique incident waves and reflected waves

Sun Zhaochen,¹ Wang Lisheng¹

1. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023*

Abstract — A new method is presented for separating oblique incident waves and reflected waves from coastal structures. The waves may be regular or irregular and the wave direction may be arbitrary. The technique is applicable to two wave gauges under a certain limitation. Two- and three-dimensional model tests have been done for vertical structures with and without air chambers. The results show that the method can be used to separate the reflected waves from the incident waves.

Key words Oblique incident waves, reflected waves, decomposition