

近岸浅水波的计算*

王运洪

(天津市水利局,天津 300074)

提要 采用理论推导与实验资料验证相结合的方法对近岸浅水波衰减计算进行研究。研究表明,波浪与浅水区运动传播衰减是各种能耗共同作用的结果,为此总结了分子粘性能耗、湍流能耗、底部渗透能耗、底部摩擦能耗、软泥海底弹性能耗等,由建立波能流平衡方程出发进行理论推导,得出各种能耗影响下波浪衰减的计算公式,并将该理论公式与作者1980年波浪水槽试验资料比较,两者基本吻合,可适用于线性及非线性各种波能耗情况的计算。

关键词 浅水波 波能 波高 计算

近岸浅水区的波浪衰减计算是研究河口、海岸动力学中重要的研究内容之一,由于它与许多近岸工程有关,因而受到广大海岸工程研究者和海洋学家的重视,并对其进行了广泛的研究。

波浪在近岸浅水地区传播时,由于各种能耗影响而造成波浪衰减,这些能耗有粘性能耗、湍流能耗、底摩阻能耗、渗流能耗等。然而,在以往的一些研究中,为简化起见,往往仅考虑一种主要能耗,忽略其他能耗,结果无形中夸大了所考虑的能耗作用而忽视了其他能耗。事实上,波浪衰减是各种能耗共同作用的结果,从这点出发,本文考虑了各种能耗,经理论推导,得出各种能耗影响下近岸区波浪衰减计算公式,公式中的系数可由实测资料确定。

1 基本微分方程

基本方程为波能流方程,其一般形式为:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} + D = 0$$

式中, E 为单位表面积水体内的波浪能量($E = \frac{1}{8} \rho g H^2$); \mathbf{F} 为单宽波峰长度内的波能流; ∇ 为微分运算符($\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y}$); D 为单位表面积水体内的能耗率。

等深区,在“稳定”情况下($\frac{\partial E}{\partial t} = 0$),如不考虑波向线间能量传递,则波能流平衡方程为:

$$cn \frac{\partial E}{\partial x} + D = 0 \quad (1)$$

* 国家环保“七·五”科技攻关项目,75-3-2-9。

收稿日期:1993年2月13日,接受日期:1993年5月27日。

(1)式中, c 为波速; n 为波能流因子, $n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d/L}{\sin h(4\pi d/L)} \right]$; d 为水深; L 为波长。

2 波浪能耗率

波浪能耗率主要有以下几种。

2.1 分子粘性能耗 D_μ 对这种能耗率的一般表达式为:

$$D_\mu = 2\pi^2 \rho \nu g \delta^2 \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度; ν 为分子动力粘性系数; δ 为波陡 ($\delta = \frac{H}{L}$), H 为波高。

(2) 式可改写成如下形式:

$$D_\mu = \alpha_\mu \frac{E}{T} \quad (3)$$

式中, $\alpha_\mu = \frac{16\pi^2}{Re^2}$; Re 为波浪雷诺数 ($Re = \frac{cH}{\nu} \frac{1}{\delta}$)。由此可见, α_μ 是 Re 的函数, 随 Re 之增大而减小。

2.2 湍流能耗 D_t 随着波浪 Re 的增加, 波浪由层流状态变成湍流状态, 这时水质点发生剧烈紊动, 波能耗迅速增加。关于波浪湍流能耗已有很多人进行了研究, 综合前人研究成果 (Longuet-Higgins, 1960), 并经理论分析后得出 D_t 的一般表达式为¹⁾:

$$D_t = K_t \rho \frac{H^3}{T^3} \quad (4)$$

根据实测资料得出, $K_t = 0.000873$ (Cao Zude, 1983)

(4) 式可改写为:

$$D_t = \alpha_t \frac{E^{1.5}}{T} \quad (5)$$

式中, $\alpha_t = \frac{K_t \delta^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{\rho g} g T^2}$

2.3 底部渗透能耗 D_p 当砂质海底渗透层厚度大于 0.3 倍波长时, 底部渗透能耗是不可忽视的。关于渗透能耗的公式很多, 经改写后均可写成¹⁾:

$$D_p = \alpha_p \frac{E}{T} \quad (6)$$

(6)式中的 α_p 与渗透系数有关。

2.4 底摩擦能耗 D_b 由底摩擦剪切应力引起的能耗是目前研究得最深入的一种能耗。最早研究底摩擦能耗的是 Jonsson (1964), 他们利用摩阻定律 $\tau = \rho C_f U |U|$ 求得底摩擦能耗表达式为:

$$D_b = \frac{C_f \rho}{b\pi} \left(\frac{\sigma H}{\sin h K d} \right)^3 \quad (7)$$

(7)式已获得广泛应用, 关键在于确定摩擦系数 (C_f)。关于如何确定摩擦系数, 至今已有人作出了研究 (王运洪, 1984; 王运洪等, 1992)。

1) 王运洪、曹祖德, 1984, 浅水区波浪衰减的研究, 全国第一届水动力学学术会议论文集, 2: 101—115。

(7) 式可改写成:

$$D_b = \alpha_b \frac{E^{1.5}}{F} \quad (8)$$

$$\text{式中, } \alpha_b = \frac{64 \sqrt{2} \pi^2 C_f}{3 \sqrt{\rho g} g T^2 \sin h^3 K d}$$

2.5 泥质弹性海底的弹性能耗 D_e 当海底由淤泥组成时, 由于波动水体的压力变化, 会诱发海底软泥振动而吸收波能。关于这种能耗, 目前研究得还较少, 认识也不一致。

2.6 其他一些能耗 D_x 其他还有一些能耗, 如水表面空气摩擦能耗, 波动时掺入空气而引起的能耗, 水槽试验时边壁能耗等等。

所有上述能耗, 从数学形式归纳起来大致有两大类, 一类是仅与波能一次方成正比, 称为线性能耗, 如上述的粘性能耗 D_μ 、层流边界层粘性能耗 D_Δ 、渗透能耗 D_p 等, 这类能耗可合在一起用一个式子表示:

$$D_1 = \alpha_1 \frac{E}{T} \quad (9)$$

$$\text{式中, } \alpha_1 = \alpha_\mu + \alpha_\Delta + \alpha_p + \dots$$

另一类能耗是与波能的 1.5 次方成正比, 称为非线性能耗, 如湍流能耗 D_t 、底摩擦能耗 D_b 等, 这类能耗也可用一个统一公式表示:

$$D_2 = \alpha_2 \frac{E^{1.5}}{T} \quad (10)$$

$$\text{式中, } \alpha_2 = \alpha_t + \alpha_b + \dots$$

3 波浪衰减计算

在实际中, 波浪衰减是多种波能耗综合作用的结果。因此, 波能流方程 (1) 可写成:

$$c n \frac{dE}{dx} + \alpha_1 \frac{E}{T} + \alpha_2 \frac{E^{1.5}}{T} = 0 \quad (11)$$

式中, α_1 和 α_2 分别为线性能耗系数和非线性能耗系数, 将 $E = \frac{1}{8} \rho g H^2$ 代入 (11) 式, 并整理简化可得下式:

$$\frac{dH}{dx} + A_1 H + A_2 H^2 = 0 \quad (12)$$

$$\text{式中, } A_1 = \frac{\alpha_1}{2 c n T}; \quad A_2 = \frac{\alpha_2 \sqrt{\rho g}}{2 \sqrt{8} c n T}$$

$$\text{整理 (12) 式后得: } \frac{dH}{A_1 H + A_2 H^2} = -dx \quad (13)$$

因为 $\frac{1}{A_1 H + A_2 H^2} = \frac{1}{A_1 H} - \frac{A_2}{A_1(A_1 + A_2 H)}$, 故 (13) 式可写为:

$$\frac{dH}{A_1 H} - \frac{A_2 dH}{A_1(A_1 + A_2 H)} = -dx \quad (14)$$

(14) 式积分后可得:

$$\frac{H}{A_1 + A_2 H} = c e^{-A_1 x} \quad (15)$$

将初始条件 $x = 0$ 时, $H = H_0$ 代入 (15) 式可得出:

$$\frac{H}{A_1 + A_2 H} = \frac{H_0}{A_1 + A_2 H_0} e^{-A_1 x} \quad (16)$$

(16) 式经整理后得:

$$\frac{H}{H_0} = \frac{e^{-A_1 x}}{1 + \frac{A_2 H_0}{A_1} (1 - e^{-A_1 x})} \quad (17)$$

将(12)式中之 A_1, A_2 值代入(17)式则得

$$\frac{H}{H_0} = \frac{e^{-\frac{\alpha_1}{2n} \frac{x}{L}}}{1 + \frac{\alpha_2 \sqrt{\rho g} H_0}{\sqrt{8} \alpha_1} (1 - e^{-\frac{\alpha_1}{2n} \cdot \frac{x}{L}})} \quad (18)$$

如令 $\bar{H} = \frac{H}{H_0}$, $\bar{x} = \frac{x}{L}$, $\alpha = \frac{\alpha_1}{2n}$, $\beta = \frac{\alpha_2 \sqrt{\rho g}}{\sqrt{8} \alpha_1}$, 则(18)式简写为:

$$\bar{H} = \frac{e^{-\alpha \bar{x}}}{1 + \beta H_0 (1 - e^{-\alpha \bar{x}})} \quad (19)$$

(19) 式为计算波浪衰减的一般式。

对于以线性波能耗为主的地区, 当可以忽略非线性能耗时, 即 $\alpha_2 = 0$, 则 (19) 式可简写成:

$$\bar{H} = e^{-\alpha \bar{x}} \text{ 或 } \bar{H} = e^{-\frac{\alpha_1}{2n} \bar{x}} \quad (20)$$

对于以非线性能耗为主的地区, 即 $\alpha_1 = 0$ 。由于, $\lim_{\alpha_1 \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-\frac{\alpha_1}{2n} \bar{x}}}{\alpha_1} = \frac{\bar{x}}{2n}$, 故由(18)式可得:

$$\bar{H} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_2 \sqrt{\rho g} H_0}{2 \sqrt{8} n} \bar{x}} \quad (21)$$

(19) 式中系数 α, β 以及 (11) 式中系数 α_1, α_2 可利用实测波浪资料求得。

现取一组水槽试验资料¹⁾与理论公式(19)(取 $\alpha = 0.0033, \beta = 0.00003$)进行比较, 两者符合很好, 见图 1。

根据这些资料, 还可进一步求得 (11) 式中的系数 $\alpha_1 = 0.01, \alpha_2 = 7.3 \times 10^{-9}$, 由此也可证明, 波浪衰减, 同时与线性能耗和非线性能耗均有关。本例为实验室内小水槽试验, 波浪要素很小, 故

以线性能耗为主。在原体现场中, 波浪较大, 可以预计, 应当以非线性能耗为主。

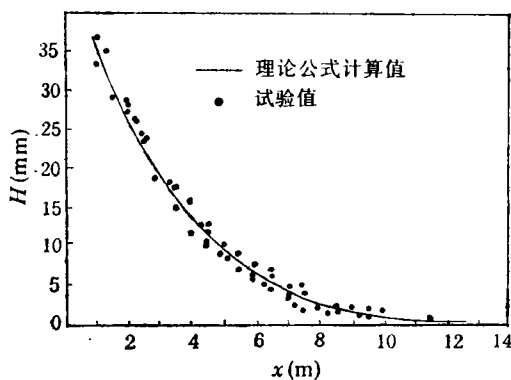


图 1 波浪衰减图

Fig. 1 Decay of waves

$$H = \frac{H_0 e^{-\alpha x/L}}{1 + \beta H_0 (1 - e^{-\alpha x/L})}$$

1) 作者研究生期间在天津大学波浪水槽所做实验, 1980。波浪水槽长 1200cm, 宽 38.1cm, 高 54.5cm。波高为 2.5—9.0cm, 波周期为 0.67—1.93s。

4 结语

4.1 本文采用理论分析与实验验证的方法,对近岸浅水波能量计算进行研究。在综合考虑各种能耗作用后,由建立波能流平衡方程,经理论推导得出各种能耗影响下波浪衰减的计算公式。

4.2 理论公式与实测波浪资料比较、验证,计算值和实测值十分接近,并得出了线性及非线性能耗系数。

4.3 本浅水波能耗计算公式既适用于线性和非线性能耗共存地区的波浪计算,也适用于只有一种能耗为主的波浪计算。

参 考 文 献

- 王运洪, 1984, 泥沙起动规律的研究, 海洋学报, 6(6): 874—880。
 王运洪, 秘兆兰, 1992, 湖泊水库湖流模拟系统, 海洋与湖沼, 23(5): 485—490。
 Cao Zude (曹祖德), 1983, Effects of wind on the wave advancing towards shore, *ACTA Oceanological Sinica*, 2(2): 178—199。
 Longuet-Higgins, 1960, Change in the form of short gravity waves on long waves and tidal current, *J. Fluid, Mech.*, 8: 565—583。
 Jonsson, I. G., 1964, Wave boundary layers and friction factors, *Proc. Coastal Eng. Conf.*, 1: 127—148。

CALCULATION ON NEARSHORE SHALLOW-WATER WAVES

Wang Yunhong

(Tianjin Water Conservancy Bureau, Tianjin 300074)

ABSTRACT

This paper analyses the various energy dissipations of waves propagating in nearshore shallow-water areas. These dissipations of molecular viscosity, turbulence, laminary viscosity in boundary layer of bottom, bottom penetration, bottom frictional drag, and soft bottom elasticity can be divided into one type that is proportional to the unit power of the wave energy (called linear energy dissipation) and another type that is proportional to the 1.5-th power of the wave energy (called non-linear energy dissipation). In some early studies, only a certain main energy dissipation mentioned above was considered for briefness, while the others were neglected. As a result, the attainable precision is rather low, and the resulting value differs far from the objective reality. This work considers the comprehensive effects of all wave energy dissipation by establishing a balance equation of wave energy current. The calculating formula for the wave decay resulting from all energy dissipations can be obtained by means of theoretical derivation. For areas mainly affected by linear energy dissipation, the formula can be simplified. This theoretical formula is very consistent with the lab observation data.

Key words Shallow-water wave Wave energy Wave height Calculation