

波浪与水流的相互影响

赵子丹

(天津大学)



在海岸、河口和泻湖通道地区，其泥沙运动的规律为该地区的动力条件所制约。那里的动力条件至为复杂，但从根本上说，可归为波浪、水流两大部分。其中的水流通常是径流、潮流、风吹流、密度流等等的综合结果。这一综合的水流严格说来也是不定常的，但由于波浪的周期甚短，故在分析波浪与水流的相互影响时，有理由把水流近似看成是定常的。

关于波浪与水流的相互影响问题有二。一是水流对波浪要素的影响；二是由于波浪的作用而引起的水流流速沿水深分布规律的变化以及与之相应的床面剪应力的变化。前人对第一方面的工作甚多，文献^[1]已有较全面总结。至于第二方面的问题则与泥沙运动关系更为密切，本文仅对此作出探讨。

一、波浪对水流流速分布的影响

波浪作用下的水质点瞬时水平分速应包括轨迹速度和传质速度。前者为周期函数（可由小振幅波理论得出），故在整个周期内不发生水体的净输移；后者为非周期性函数，将产生水体的净输移。

传质速度主要有Stokes的非粘性解答和Longuet-Higgins, M.S(1953)^[2]的粘性解答，后者的表达式为：

$$U = \frac{a^2 \sigma k}{4 \sinh^2 kd} \left[2 \cosh(2kd(\mu-1)) + 3 + kd \sinh 2kd(3\mu^2 - 4\mu + 1) + 3 \left(\frac{\sinh 2kd}{2kd} + \frac{3}{2} \right) (\mu^2 - 1) \right] \quad (1)$$

式中 U 是波浪的传质速度； a 是波浪的振幅，它

等于波高之半（ $a=H/2$ ， H 为波高）； $\sigma=2\pi/T$ ， T 为周期； $k=2\pi/L$ ， L 为波长； d 为水深， μ 为计算点离静水面的相对距离， $\mu=Z/d$ ， Z 为垂直坐标，取由静水面向下为正，即在水面处， $Z/d=0$ ；在海底， $Z/d=1$ 。

(1)式也可写成

$$U = a^2 \sigma k F^{(P)}(\mu) \quad (2)$$

$$\text{其中：} F^{(P)}(\mu) = \frac{1}{4 \sinh^2 kd} \left[2 \cosh(2kd(\mu-1)) + 3 + kd \sinh 2kd(3\mu^2 - 4\mu + 1) + 3 \left(\frac{\sinh 2kd}{2kd} + \frac{3}{2} \right) (\mu^2 - 1) \right] \quad (3)$$

关于 $kd=0.5$ ， 1.0 ，以及 1.5 时的 $F^{(P)}(\mu)$ 的值，见图1示。实验已证明^[3]，在近海区的水深条件下，Longuet-Higgins的解答比较符合实际。

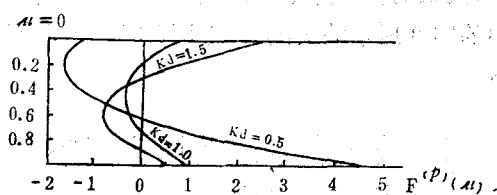


图1 $F^{(P)}(\mu)$ 与 μ 的关系曲线

因为轨迹运动呈周期性变化，其瞬时水平分速在一个周期内的平均值应等于零，故在考虑波浪对水流流速的影响时，可以只考虑传质速度的影响，从而得出给定空间点处的流速向量 \underline{u} 为

$$\underline{u} = \underline{U} + \underline{v} \quad (4)$$

式中 \vec{U} 为波浪传质速度的向量， \vec{v} 为没有波浪时的水流流速向量。作为一个特例，即研究定常均匀水流流向与波向相同时的情况，令

$$u = U + v \quad (5)$$

如果传质速度的方向与波向相同，则 U 为正值，否则为负值。

分析Longuet-Higgins的解答可见：1. 当相对水深较大时（例如当 $kd=1.0, 1.5$ 时），面流、底流的流向与波向相同，中层水体的流向与波向相反；2. 当相对水深较小时（例如当 $kd=0.5$ 时），面流流向与波向相反，底流流向与波向相同；3. 在所有情况下，全断面水体的净输运量等于零；4. 当 kd 值相同时，就给定的空间点（即给定的 μ 值）处而言，传质速度数值的大小还与 H^2/TL 成正比。故可以推论，波浪对定常均匀水流流速沿垂线分布的影响是：（1）当 kd 值较大时，波浪作用使水流流速在面层、底层处增大，中层处减小；（2）当 kd 值较小时，波浪的作用使水流的流速在面层处减小、底层处增大；（3） kd 值愈小，因波浪的作用而引起床面附近的水流流速的增长也愈显著；（4）在给定的 kd 值的情况下，对于同一空间点（即给定 μ 值）而言，参数 $\frac{H^2}{TL}$ 愈大，波浪作用使原有水流流速所发生的改变愈显著；（5）就全断面的平均流速的数值而言，波浪的作用并不能使它产生改变。文献^[4]中的图8所示的实测成果证明了笔者的论断。

二、波浪和水流共同作用下的床面剪应力的确定——现有成果的评述

（一）Bijker, E. W., (1966)^[5]根据混合长度假设而得的结果。分析时把水流考虑为定常均匀流，流向与波向成一交角。

（二）用波浪辐射应力的概念来推导。分析时把水流考虑为定常均匀流，流向与波向一致。

（三）Jonsson, I. G. (1966)^[6]的解答。分析时把水流考虑定常均匀流，流向与波向可以一致，或有一交角。在波浪、水流共同作用下的床面剪应力 $\tau_{w,c}$ 为

$$\tau_{w,c} = \frac{1}{2} \rho f u \left| \vec{u} \right| \quad (6)$$

ρ 为水体的密度， \vec{u} 为波浪、水流共同作用下的床面瞬时水平速度的合成向量，它应为

$$\vec{u} = \vec{u}_w(t) + \vec{u}_c \quad (7)$$

$\vec{u}_w(t)$ 为作用在床面的波浪瞬时水平分速的向量， \vec{u}_c 为作用在床面的水流流速向量， f 为波浪、水流共同作用下的摩擦系数，它被定义为

$$f = \frac{f_w \left| \vec{u}_w(t) \right| + f_c \left| \vec{u}_c \right|}{\left| \vec{u}_w(t) \right| + \left| \vec{u}_c \right|} \quad (8)$$

f_w, f_c 分别为波浪或水流单独作用下的摩擦系数。按照Jonsson, I. G. (1966)的观点， f_c 就是Darcy-Weisbach系数，它是针对定常均匀流的情况下给出，至于公式(8)的结构也难于从力学关系上找出依据。

在定常均匀流的假定下，水流流速沿垂线分布的规律通常用对数分布式表示。实践表明，在海岸、河口及泻湖通道地区，水流流速沿垂线分布的规律常与对数分布有较大的区别，主要表现在：1. 流速沿垂线的改变常常比对数分布的剧烈；2. 在一条垂线上的不同高程处的水流方向可以是反向的。这就使“均匀流”的假定有时无法使用。

三、波浪水流共同作用下的床面剪应力的确定——建议的方法

这里仍用(6)式表示波浪、水流共同作用下的床面剪应力，用(7)式表示波浪、水流共同作用下的床面瞬时水平速度的合成向量，用 $u_w(t)$ 表示刚刚在床面边界层以外的波浪的瞬时水平分速，按小振幅波理论，它应为

$$u_w(t) = \frac{ad}{\sinh kd} \cos \sigma t \quad (9)$$

用 u_c 表示作用在床面上的综合水流的流速 (包括波浪的传质速度)。这里对流速 u_c 只要求“定常”，并不限定一定为“均匀流”。

仿效 Thornton, E. B (1970)^[7] 的分析方法, 把波浪运动的床面剪应力分量写成

$$\vec{\tau}_w = \tau_{w,c} \frac{\vec{u}_w(t)}{u} = \rho \frac{f}{2} \left| \vec{u} \right| \vec{u}_w \quad (10)$$

其方向即在同一瞬时的波浪水平轨迹速度的运动方向。同样, 可写出在水流方向的剪应力分量为

$$\vec{\tau}_c = \vec{\tau}_{w,c} \cdot \frac{u_c}{u} = \rho \frac{f}{2} \left| \vec{u} \right| u_c \quad (11)$$

取波浪、水流的摩擦系数分别为 f_w 、 f_c , 即

$$f_w = f \left| \frac{\vec{u}_w}{\vec{u}} \right| \quad (12)$$

$$f_c = f \left| \frac{\vec{u}_c}{\vec{u}} \right| \quad (13)$$

于是得两个相应的摩擦力的分量为

$$\vec{\tau}_w = \rho \frac{f_w}{2} \vec{u}_w \left| \vec{u}_w \right| \quad (14)$$

$$\tau_c = \rho \frac{f_c}{2} u_c^2 \quad (15)$$

上述写法, 与文献^[7]完全相同, 其差别在于这里的 u_c 代表床面的水流流速, 而不再是沿垂线的平均流速。为此, 需要求出在本文分析条件下的 f_c 的表达式。这里运用 (12)、(13) 式得出

$$f = f_w \left| \frac{\vec{u}_w}{\vec{u}} \right| \quad (16)$$

$$f = f_c \left| \frac{u_c}{u} \right| \quad (17)$$

式 (16) 与 (17) 的右部应相等, 于是有:

$$f_c = f_w \left| \frac{\vec{u}_w}{u_c} \right| \quad (18)$$

从而得

$$\tau_c = \rho \frac{f_w}{2} \left| \vec{u}_w \right| u_c \quad (15')$$

因此, 问题归结于找出波浪的摩擦系数 f_w , 它已为 Jonsson 得出 (图 2)。

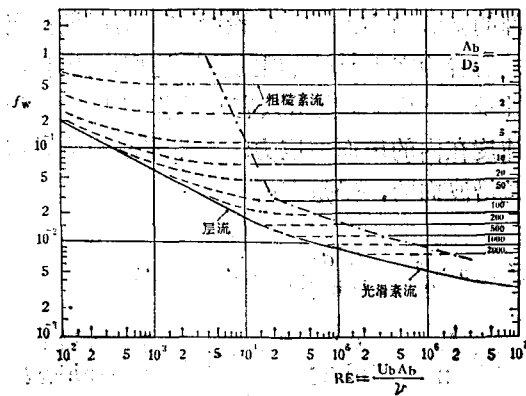


图 2. Jonsson 的波浪摩擦系数图解

由图 2 可知, f_w 是 $RE = \frac{u_b A_b}{\nu}$ 及 A_b/D_s

的函数, 其中

$$u_b = \frac{ad}{\sinh kd} \quad (19)$$

是由公式 (9) 给出的 $u_w(t)$ 的最大值;

$$A_b = \frac{u_b}{\sigma} = \frac{a}{\sinh kd} \quad (20)$$

是初始流体质点由其平均位置起算的最大迁移量; ν 为水的运动粘滞系数; D_s 为床面的等效沙粒糙率。Jonsson 曾经指出, 振荡边界层开始进入紊流区的指标为

$$\left. \begin{aligned} RE &\geq 1.26 \times 10^4 \\ Ab/D_s &\leq \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{RE} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式 (21) 的前者表示雷诺数的限制, 后者表示

在边界层中,在上述 A_b/D_s 值时发生由层流至紊流的转化。

四、波浪作用下的床面剪应力的确定——建议的方法

在波浪作用下,床面上的瞬时水平分速为

$$\vec{u} = \frac{a\sigma}{\sinh kd} \cos\sigma t + \frac{5}{4} \frac{a^2\sigma k}{\sinh^2 kd} \quad (22)$$

右部的前者由小振幅波理论给定,呈周期性变化;后者为文献^[2]给出的传质速度,为非周期性量。今取 τ_w' 表示只有波浪作用下考虑传质速度在内的床面剪应力,由于床面的传质速度是沿波向的,于是有:

$$\begin{aligned} \tau_w' &= \rho \frac{f_w}{2} \frac{a^2\sigma^2}{\sinh^2 kd} \cos\sigma t |\cos\sigma t| \\ &+ \rho \frac{f_w}{2} \frac{a\sigma}{\sinh kd} |\cos\sigma t| \left(\frac{5}{4} \frac{a^2\sigma k}{\sinh^2 kd} \right) \\ &= \rho \frac{f_w}{2} \frac{a^2\sigma^2}{\sinh^2 kd} |\cos\sigma t| (\cos\sigma t + \\ &+ \frac{5}{4} \frac{ak}{\sinh kd}) \quad (23) \end{aligned}$$

如果不考虑传质速度的影响,则有

$$\tau_w = \rho \frac{f_w}{2} \frac{a^2\sigma^2}{\sinh^2 kd} \cos\sigma t |\cos\sigma t| \quad (24)$$

它就回到Jonsson的解答。方程(23)与(24)

的差别在于:前者在对时间变化的关系上是不对称的,而后者则是对称的。一般认为,底沙的输沙率与函数 $(\tau - \tau_0)^m$ 成正比,其中 τ 为作用在床面上的瞬时剪应力, τ_0 为临界剪应力(只有在 τ 的数值大于 τ_0 时,泥沙才会输移), m 为一系数。根据我们在1960年对波浪作用下的浮泥输送的实验研究,以及Bijker, E.W.等(1976)^[8]所作的波浪对底沙(平均粒径 $D_m = 150\mu m$)输送的实验研究,都证明了波浪作用下的底沙运动不仅具振荡性质,且有净的输移,这就反证了公式(23)的合理性。

参 考 文 献

- [1] Jonsson, I. G., 1978. Stability of Tidal inlets, ed. by Bruun, p., 162—203.
- [2] Longuet-Higgins, M. S., 1953. phil. Trans. Roy. Soc. London, A. № 903 Vol. 245, 535—581.
- [3] Russell, R. C. H. and J. D. C. Osorio., 1957. proc. Gth. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 171—183.
- [4] Van Hoften, J. D. A. and S. Karaki, 1976. proc. 15th Conf. coastal Engineering, ASCE, 404—422.
- [5] Bijker, E. W., 1966. proc. 10th Conf. Coastal Engineering, ASCE, 746—765.
- [6] Jonsson, I. G., 1966. proc. 10th Conf. Coastal Engineering, ASCE, 127—148.
- [7] Thornton, E. B., 1970. proc. 12th Conf. Coastal Engineering, ASCE, 291—308.
- [8] Bijker, E. W. Van Hijum, E. and P. Vellinga., 1976. proc. 15th Conf. Coastal Engineering, ASCE, 1149—1167.

THE INTERACTION BETWEEN WAVE AND CURRENT

Zhao Zidan

(Tianjin University)

Abstract

This paper deals with the interaction between wave and current. An approximate method is suggested to calculate the bed shear stress under the combined action of wave and current, the bed shear stress can also be used to calculate the sediment transport in the coastal zone.