

波と流れが斜交する場合の底面付近の水理特性

京都大学工学部 岩垣 雄一, 浅野 敏之, 佐藤工業○名村 均

1. 緒言 沿岸海域に構造物を設置したことによって生じる海床変形の予測モデルが、最近活発に研究されているが、予測の精度を向上させるためには個々の現象の力学的機構の解明が必要である。波と流れが斜交する場合の底面近傍の水理特性を理解することは、上記の課題に対してきわめて重要であるが、従来の研究には Liu-Dalrymple (1978) や Grant-Madsen (1979) 等の研究があるのみで不十分な理解のまゝに留まっている。本研究は波と流れが斜交する時の底面せん断応力の特性を議論し、その特性を明らかにするとともに、その結果の応用の一つとして、波と流れが斜交する時の掃流砂運動について検討する。

2. 底面せん断応力の摩擦係数による表示 Grant-Madsen は底面摩擦応力 τ を波の水粒子速度 $\vec{u} \cos \theta$ と流れの流速 $\vec{v}$ の和として次式で表わした。

$$\tau = \frac{1}{2} \rho f w (\vec{u}^2 + \vec{v}^2) \left(\frac{\vec{u}}{\sqrt{\vec{u}^2 + \vec{v}^2}} \right) \quad \text{--- (1)} \quad \text{ただし, } \begin{cases} \vec{u} = u \cos \theta + \hat{v} \cos \theta_0 \\ \vec{v} = \hat{v} \sin \theta_0 \end{cases} \quad \text{--- (2)}$$

θ_0 は波と流れのなす角である。(1) 式の表示は Liu-Dalrymple が Longuet-Higgins (1970) の沿岸流理論を入射角が大きいうちに拡張した時に用いた $\vec{u}$ の表示と本質的に同じである。(1) 式の表示はいくつかの問題点を有しているが、紙数の関係で省略する。(1) 式を時間平均し、底面せん断応力の時間平均した方向 $\bar{\theta}_0$ を求めると、流れの方向 θ_0 とは一致しないという結果を得る(図-2)。しかし、波の水粒子運動に正弦波を仮定したため、流れの流速 $\hat{v}$ が波の水粒子速度振幅 u より十分小さい場合でも、時間平均したせん断応力の方向が波の方向に近づかなければならぬ結果となっている。

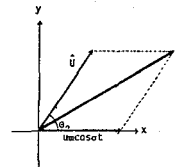


図-1 座標軸の定義

3. 乱流境界層方程式に基づく底面せん断応力の評価

x 方向の乱流境界層方程式は次式となる。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (Kz)^2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} / \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right\} \quad \text{--- (3)}$$

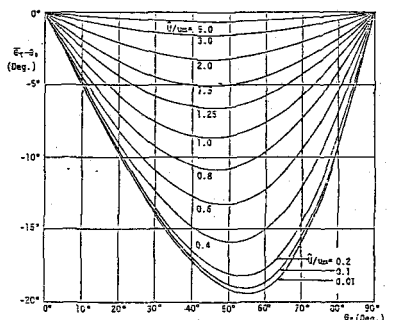
ここに K はカルマン定数、 p は圧力であり、 $\bar{u}$ は(2)式で定義したように、波と流れの合成成分を意味する。y 方向についても(3)式と同様な式が得られる。(3)式を線型化すると次式となる。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \hat{v} \cos \theta \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (K u_*^* z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}) \quad (z \leq \delta_w) \quad \text{--- (4)}$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (K u_*^* z \frac{\partial \hat{v} \cos \theta_0}{\partial z}) \quad (z > \delta_w) \quad \text{--- (5)}$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (K u_*^* z \frac{\partial \hat{v} \cos \theta_0}{\partial z}) \quad (z \leq \delta_w) \quad \text{--- (6)}$$

(4) 式は波の成分 u に対する表示式、(5)、(6) は流れの成分 $\hat{v}$ に対する表示式である。 u_*^* , u_{*w}^* はそれぞれ流れのみ、共存場

図-2 波と流れがなす角 θ_0 と周期平均したせん断応力の方向 $\bar{\theta}_0$ との関係

Yuichi IWAGAKI, Toshiyuki ASANO, O Hitoshi NAMURA

に対する摩擦速度, δ_w は波動境界層厚である。(4)式の右辺第2項は(3)式の右辺第2項と $u_{cw}^* = \text{const.}$ を導入することにより線型化したものである。 u_{cw}^* は境界層方程式を解いた後で求まり, 次式のように波と流れの非線型干渉が入った式となる。

$$u_{cw}^{*2} = \{u_c^{*2} + 2Au_{cw}^*u_c^* \cos \theta_0 + A^2 u_{cw}^{*2}\}^{1/2} \quad \text{ただし } A = k z_0 \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=z_0, \max} \quad \text{--- (7)}$$

しかし, 波と流れの底面せん断応力 τ_w と τ_{cw} は線型和の形であるので, 時間平均したせん断応力の方向は流れの方向と一致してしまふ。したがって, 波と流れの斜交場における底面せん断応力の特有の性質を導くためには, (3)式右辺第2項の形で議論しなくてはならない。厳密には, (3)式および θ 方向に対する(3)式に相当する式を解く必要があるが, 本研究ではその途中の段階として, 波による底面せん断応力を(3)式において $\bar{u} \rightarrow u$ とした式で求め, 流れによるせん断応力とベクトル合成することにした。計算には有限要素法を用いた。

4. 波と流れの斜交場における掃流砂運動に対する適用

波と沿岸流などの流れが共存する時の漂砂運動について, 根木・出口(1978), 瀬岡ら(1981), 清水ら(1983)が実験あるいは観測を行っている。これらの研究に共通する結果は, 平均的な砂の移動方向は流れの方向とは一致しないということである。ここでは波と流れの斜交場での底面せん断応力の特性から, 掃流砂の運動を議論し, 上述の実験・観測結果を説明する基礎的資料を得ようと考えた。掃流漂砂量の時間的変化は, 土屋ら(1984)の提案式を2次元に拡張した次式を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{q} / u_c(t) D) = 5 \{ \psi(t) - \psi_c \}^2 \quad \text{--- (8)}$$

上式で $\bar{q}$ は漂砂量, u_c は摩擦速度, D は砂粒径, ψ, ψ_c はそれぞれシールズ数, 限界シールズ数である。ただし, 上式では土屋らが示した加速度の効果は無視している。

(8)式において $u_c(t) = \sqrt{\tau(t) / \rho}$, $\psi(t) \propto \{u(t)\}^2$ を考慮すると, $\psi_c = 0$ とすれば $\bar{q} \propto \tau^2$ となり, τ を波と流れの成分の線型和で表わしたとしても, 1周期平均した $\bar{q}$ の方向 $\bar{\theta}_q$ は流れの方向 θ_0 とは一致しない。波と流れの諸量および D, ψ_c を与えて, 掃流砂量 $\bar{q}$ とその移動方向 $\bar{\theta}_q$ を計算した結果の1例を図-3, 図-4に示す。図-5は1周期平均した掃流砂の方向 $\bar{\theta}_q$ についての結果を示したので, (3)式に基づく非線型の掃流砂モデルでは, 流れに対して波の水粒子速度の成分が卓越する場合, すなわち, 横軸の $u_m / (u_m + |U|)$ が1に近づくとき, $\bar{\theta}_q$ が0に漸近し, 波の方向に近づくことがわかる。

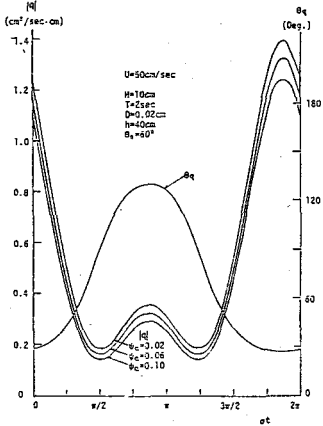


図-3 掃流砂量 $\bar{q}$ と掃流砂の移動方向 $\bar{\theta}_q$ の波の位相による変化 (線型モデル)

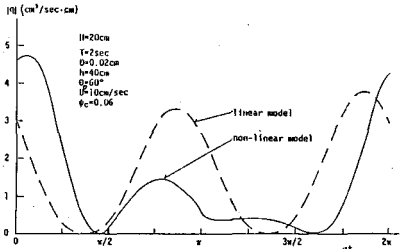


図-4 掃流砂量の絶対値 $|q|$ の波の位相による変化

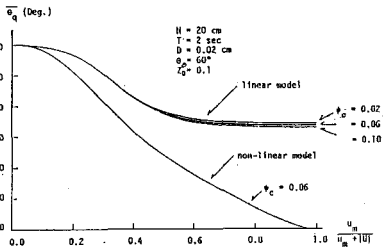


図-5 時間平均した掃流砂の移動方向 $\bar{\theta}_q$ と波と流れの構成比 $\frac{u_m}{u_m + |U|}$ の関係