

不規則波動下の底面せん断力特性に関する研究

M. A. Samad*・田 中 仁**・B. M. Sumer***
J. Fredsøe****・C. Lodahl*****

1. はじめに

近年, プーシネスク方程式に基づく波動計算と組み合わせた海浜地形変化予測計算が行われることがある (例えば, 佐藤・Kabiling, 1994)。この際, 波形は一般に非正弦的となるため, 従来の正弦波の摩擦係数などは使用できない。このため, 底面せん断力 τ_0 の算定には, 各位相での流速の二乗に比例すると仮定する便法なども取られるが, その算定法の精度には不明な点が残されている。そのため, ①波動モデルと②砂移動モデルとからなる地形変化予測モデルの全体の精度を見たとき, 両者をつなぐせん断力評価の部分の精度評価が欠落している。わずかに, 統計量に関して理論的検討を行ったものとして, 光信・佐藤 (1989) や Myrhaug (1995) などが挙げられるが, 実験的検討は皆無に近い状態にある。

そこで, 本研究では, 不規則波動の下での底面せん断力特性について, 主に乱流モデルによる数値実験により定量的検討を行った。

2. 水理実験と数値計算の方法

正弦振動流実験においては, 流速分布に対数則を当てはめるなどしてせん断力を求めることが行われるが, 不規則振動下ではそのランダム性ゆえに, 流速計を移動させて各位相ごとのアンサンブル平均速度分布を得ることは極めて困難である。そこで, ここでは田中ら (1997) によるホットフィルムセンサーによるせん断力測定データと, 乱流モデルを用いた数値実験により詳細な底面境界層特性を調べた。

数値実験では, まず表面波形として Bretschneider・光易型スペクトルを与え, これから Goda (1970) にならって底面流速の時系列を求めた後, 境界層方程式に代入して流れ場を求めた。乱流モデルとしては, Jones and Launder (1972) により提案された低レイノルズ数 $k-\epsilon$ モ

デルを用いた。同モデルの精度については既に正弦振動流を対象に確認している (Sana and Tanaka, 1996, サナ・田中, 1996)。なお, 層流のみを対象とした不規則波動境界層に関する検討結果については, 別報にて報告している (サマド・田中, 1998)

3. 結果と考察

3.1 層流時の応答関数

層流状態での底面せん断力に対しては, 水位変動とせん断力との間の応答関数について, 次式の様な表現式が得られる (光信・佐藤, 1989)。

$$H_{\tau}(f) = \left\{ \frac{S_{\tau}(f)}{S_{\eta}(f)} \right\}^{1/2} = \sqrt{2} \beta \mu \frac{\omega}{\sinh kh}, \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで, $S_{\tau}(f)$, $S_{\eta}(f)$: 底面せん断力と表面波形のスペクトル, f : 周波数, μ : 流体の動粘性係数, ω : 角周波数, k : 波数, h : 水深である。まず, 式 (1) について実験値との比較を行う。

実験値としては田中ら (1997) によるものを用いた。実験は, 長さ 30 m, 幅 80 cm, 高さ 60 cm の水路において水深を 20.3 cm に固定して行われた。測定項目は, 底面せん断力, 境界層外縁流速, および水位変動である。底面せん断力の測定には, ホットフィルム平面センサーを用いた。その原理上, 絶対値のみしか得られないが, 以下では本来負の値である位相を判断し, 負側に折り返して示した。流速測定は一成分レーザ流速計を用い, 底面より 2.8 cm の点で境界層外縁流速 U を測定した。水位変動は容量線式波高計によった。このデータは元来不規則波を対象とした実験ではないが, 実験データの中には基本周波数成分以外の高周波数成分も含まれるため, 式 (1) との比較に使用することが出来る。

実験で得られた流速とせん断力の波形を図-1 に示す。峰部の流速波形の相違に依じて, せん断力の波形に顕著な違いが見られる。たとえば, (A), (B) の波の様に谷位相で一度加速が鈍った後に再び加速する時には, 二度目の加速時に対応する二つ目のピークがせん断力波形に見られる。これに対して, この様な速度変動が見ら

* 正会員 M.Eng. 東北大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻
** 正会員 工 博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻
*** Ph.D. デンマーク工科大学助教授 水理工学研究所
**** Ph.D. デンマーク工科大学教授 水理工学研究所
***** Ph.D. 前デンマーク工科大学大学院博士課程 水理工学研究所

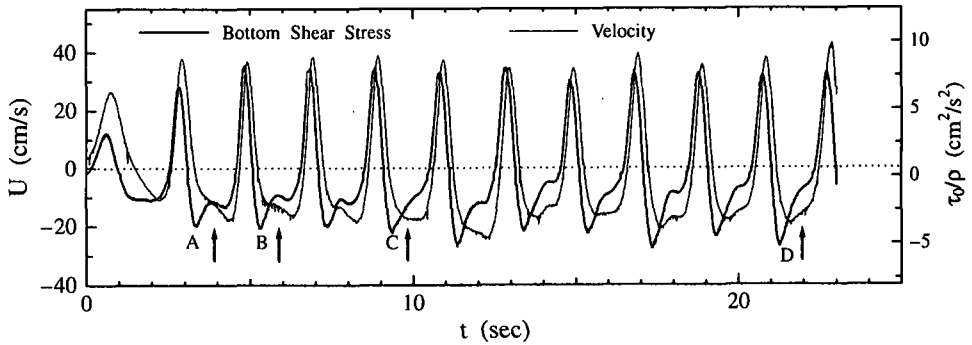


図-1 流速とせん断力の変動

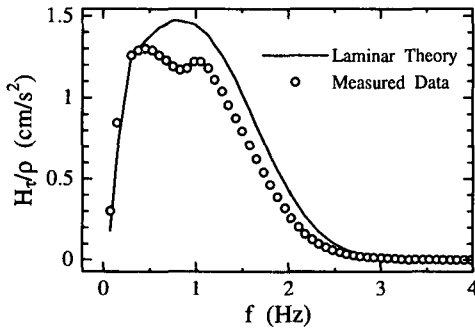


図-2 層流時の応答関数

れない (C), (D) の波では谷位相での二つ目の山が見られない。この様に、層流時のせん断力波形においては高周波成分の増幅が特徴的である。

図-2 は流速とせん断力の間の応答関数 $H_r(f)$ である。実験は理論 (式 (1)) と良い一致を示していることがわかる。

3.2 計算結果

a) 層流時と乱流時のせん断力と乱れ

異なる三つのレイノルズ数に対する計算結果を図-3, 図-4, 図-5 に示した。ここで、レイノルズ数は有義波の諸元に基づき次式で定義した。

$$RE_{1/3} = \frac{U_{1/3}^2}{\omega_{1/3} \nu} \quad (2)$$

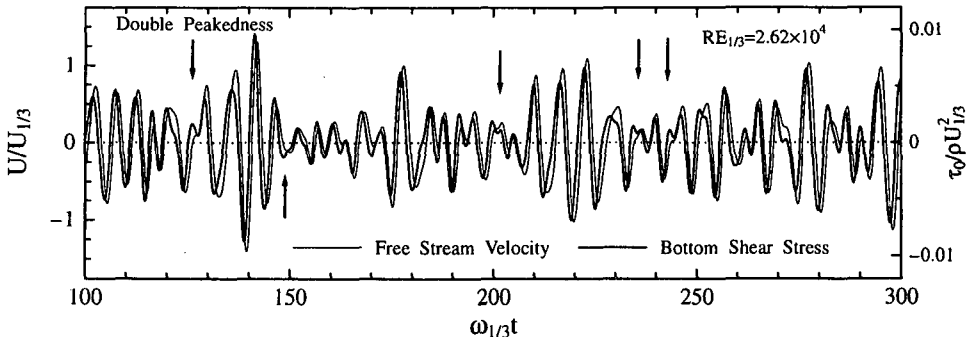
ここに,

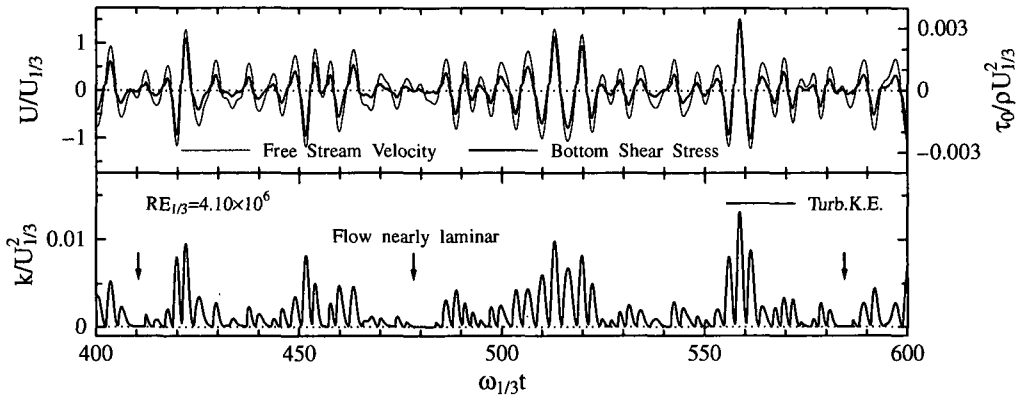
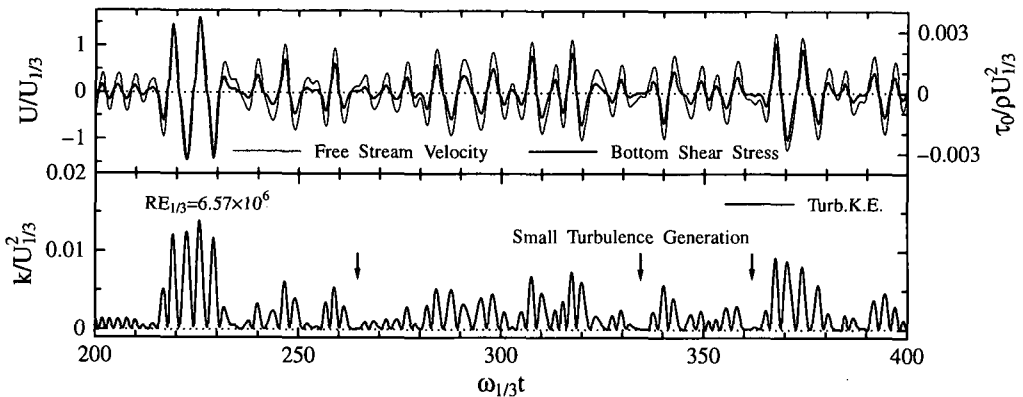
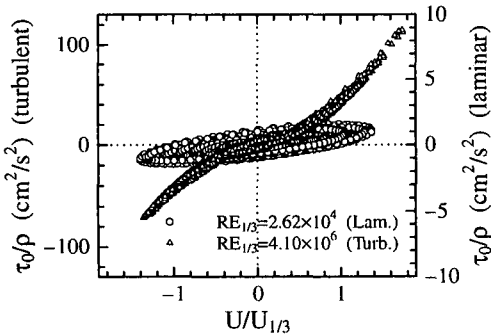
$$U_{1/3} = \frac{\pi H_{1/3}}{T_{1/3}} \frac{1}{\sinh kh}, \quad \omega_{1/3} = \frac{2\pi}{T_{1/3}} \quad (3)$$

であり、 $H_{1/3}$, $T_{1/3}$: 有義波の波高, 周期である。図-3, 図-4, 図-5 に示したケースのレイノルズ数はそれぞれ 2.62×10^4 , 4.10×10^6 および 6.57×10^6 である。式 (2) が正弦振動流のレイノルズ数に等価であると仮定すれば、最初のケースは層流に相当し、後の二つは完全乱流である。図-3 では乱れ強度 k がほぼゼロであり、この点からも層流と判断された。図-1 に見られた高周波成分の顕在化が特徴的である (図中矢印)。また、流速とせん断力との間の顕著な位相のズレが見られる。一方、図-4, 図-5 に示したケースではこの位相差が小さい。また、層流時に見られた高周波数成分が見られない。ただ、矢印で示すように流速が小さくなると、乱れ強度 k も極端に減少する。ここで、 k の計算点は有義波周期を用いて計算されるストークス層厚さの高さである。

b) 乱流時のせん断力瞬時値の計算法

不規則波動下での地形変化計算の際には、せん断力の瞬時値を必要とすることがある。例えば、佐藤・Kabiling (1994) は $\tau_0 \propto \rho U |U|$ と仮定している。ここでは、今回得

図-3 計算結果 ($RE_{1/3} = 2.62 \times 10^4$)

図-4 計算結果 ($RE_{1/3}=4.10 \times 10^6$)図-5 計算結果 ($RE_{1/3}=6.57 \times 10^6$)図-6 τ_0 と U との関係 ($RE_{1/3}=2.62 \times 10^4, 4.10 \times 10^6$)

られたせん断力波形の瞬時値を、正弦振動流の摩擦係数をもとに求める手法を検討する。そこで、まず先に示した3つのケースについて、境界層外縁流速 U とせん断力 τ_0 の関係を調べた。結果を図-6 および図-7 に示した。一般に、両者の間には位相差があるためにループを描くが、層流時には両者がほぼ線形関係にある。一方、乱流時の値は放物線に類似した形を示す。また、乱流時には

位相のズレが小さいため、ループの広がり層流時より小さい。

図-7 には乱流時の結果のみを示した。流速が小さいときにはわずかな位相のズレが強調されて示されるためにばらつきが大きい。高い速度の位相に限れば両者が良い直線関係を示している。また、二つのケースで勾配に差が見られない。図より、乱流時のせん断力は速度の約1.7乗に比例していることが分かる。この結果を参考にして、せん断力の瞬時値を計算するための手法について考察を行う。

まず、正弦波動下での摩擦係数の式形を考慮すれば、もっとも自然な計算法は佐藤・Kabiling (1994) により提案された次式であろう。

$$\tau_0(t) = \frac{\rho}{2} f_w U(t) |U(t)| \dots \dots \dots (4)$$

現実には流速とせん断力の間に位相差が存在するが、図-7 によれば、低速時を除けばその効果は無視できる程度なので、式(4)では位相差を考慮していない。本研究は滑面を対象としているので、上式の摩擦係数につ

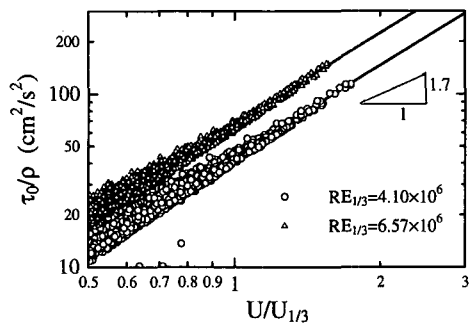


図-7 τ_0 と U との関係 ($RE_{1/3}=4.10 \times 10^6, 6.57 \times 10^6$)

いては, Fredsøe and Deigaard (1992) による次式を用いることとする。

$$f_w = 0.035 RE^{-0.16} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで, レイノルズ数の定義は次式であり, 一波毎の周期に基づく各周波数 ω と一波毎の流速の最大値 U_c とから得られる。

$$RE = \frac{U_c^2}{\omega \nu} \quad \dots\dots\dots (6)$$

以上の評価法を Method 1 とする。一方, 式 (6) に含まれる流速についても時間依存性を持たせる表現式も考えられ, これを式 (5) に代入した後に式 (4) に使用して次式を得る。

$$\tau_0(t) = \frac{\rho}{2} 0.035 (\omega \nu)^{0.16} U(t) |U(t)|^{0.68} \quad \dots\dots\dots (7)$$

この方法を Method 2 とする。すなわち, 先の方法ではせん断力を流速の二乗に比例するものと仮定するのに対し, この方法では速度のべき乗が 1.68 となり, 図-7 で得られた知見により近いものになっている。

$k-\epsilon$ モデルによる計算値と上記二つの簡便法による計算値との比較を, 図-8 および図-9 に示す。図より,

Method 2 により極めて良好な計算値が得られることが分かる。また, Method 1 による計算についても, ピーク値が幾分過小評価気味ではあるが, 満足のいく結果が得られている。

砂移動現象を扱う際には粗面乱流域での議論が必要であり, 上記と同様な検討を行うことにより, 簡便な計算法を定めることが出来よう。

4. おわりに

本研究では, 不規則波動下における底面せん断力について検討を行った。主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 田中ら (1997) の実験から得られる層流時のせん断力応答関数は, 式 (1) で与えられる理論値に近いものであった。
- (2) 数値実験により, 層流時・乱流時のせん断力変動特性の特徴が明らかになった。
- (3) 不規則波動下でのせん断力を求めるため便法について検討を行った結果, 式 (7) により精度の高い推定を行えることが分かった。式 (4) による計算値はピーク付近で幾分過大であった。

謝辞: 本研究に対して文部省科学研究費の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- アーマド サナ・田中 仁 (1996): 低レイノルズ数 $k-\epsilon$ モデルの管内振動流への適用性に関する研究, 水工学論文集, 第 40 巻, pp. 779-785.
- 佐藤慎司・Michael B. Kabiling (1994): 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 401-405.
- 田中 仁・Sumer, B.M. and Fredsøe, J. (1997): クノイド波動下における層流底面境界層の解析解とその実験的検証, 土木学会論文集, 第 572 号/II-40, pp. 85-90.

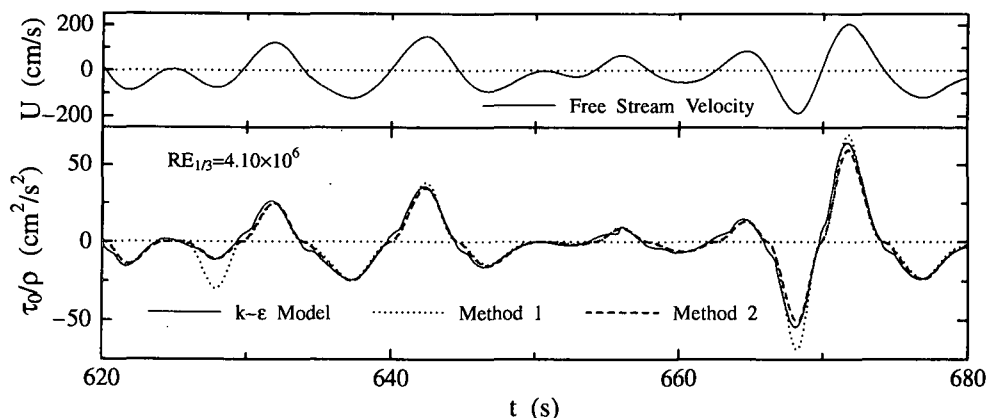


図-8 せん断力簡易計算法の精度 ($RE_{1/3}=4.10 \times 10^6$)

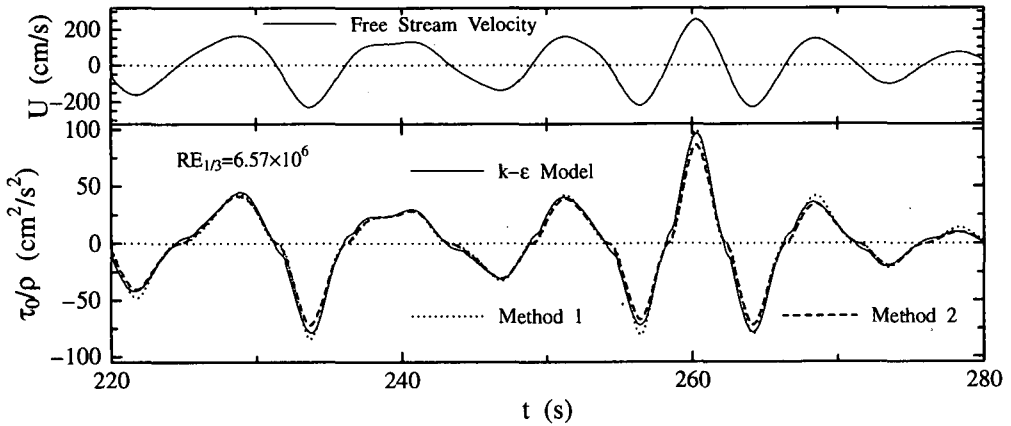


図-9 せん断力簡易計算法の精度 ($RE_{1/3}=6.57 \times 10^6$)

光信紀彦・佐藤慎司 (1989): 不規則波浪場での底面流速および底面摩擦の代表値の取り扱いについて, 土木学会第 44 回年次学術講演会講演集, II, pp. 770-771.

ムスタファ アタウス サマド・田中 仁 (1998): 不規則波動境界層の特性に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第 14 巻, pp. 113-118.

Fredsoe, J. and Deigaard, R. (1992): Mechanics of Coastal Sediment Transport, Wold Scientific, 369 p.

Goda, Y. (1970): Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation, Rep. of Port & Hour. Research

Inst., Vol. 9, No. 3, pp. 3-57.

Jones, W. P. and Launder, B. E. (1972): The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301-314.

Myrhaug, D. (1995): Bottom friction beneath random waves, Coastal Engineering, Vol. 24, pp. 259-273.

Sana, A. and Tanaka, H. (1996): The testing of low Reynolds number $k-\epsilon$ models by DNS data for an oscillatory boundary layer, Flow Modeling and Turbulence Measurements VI, pp. 363-370.