

交差する波と流れによる抵抗則の検討

田中 仁¹・AHMAD SANA²

¹正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

²正会員 M. Eng. 東北大学助手 工学部土木工学科 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

著者の一人によりすでに提案されている交差する波・流れ共存下抵抗則の妥当性を検討するために、過去の実験データを収集した。算定式と実験値との比較の結果、算定式による値が過小となる傾向が見られた。検討の結果、遷移域での内挿を行うための重み関数を修正することにより両者の関係が改善されることがわかった。

Key Words : waves and current, turbulent flow, friction coefficient, flow regimes

1. 緒 言

三次元海浜変形モデルでは、まず波浪場と海浜流場の計算を行った後、波と流れによる摩擦係数により剪断力を計算し、これから得られる漂砂量を用いて地形予測を行う。よって、抵抗則の精度が地形予測精度に直接的に反映されることになる。

波と流れによる境界層理論や抵抗則の検証に用いられるデータは二次元造波水路で得られたものが多く、交差条件での実験はきわめて少ない。三次元海浜変形モデルを適用する砕波帯内や河口近傍において、一般に波と流れが交差していることを考えると、直線水路でのデータによる境界層理論の検証は十分ではない。交差する波・流れ場においては境界層が三次元的構造を有し、一周期内に剪断応力の作用方向が二次元平面上で複雑に変化するのに対し、二次元造波水路中では順・逆の二方向にしか変化しないからである。交差する波と流れによる底質移動量・移動方向はこのような複雑な剪断応力の変化特性と密接に結びついており、境界層理論の検証もこのような交差条件下での実験値により総合的に行うことが望まれる。

先に著者の一人が波・流れの共存場の抵抗則を提案した際には、使用できるデータの制限から交差場でのデータとの比較は行われていなかった(田中・トゥー¹⁾、以下前報と呼ぶ)。その後、交差条件下での実験の報告が幾つかなされている(例えば Arnskov et al.²⁾)。本研究ではこれらの斜交する波・流れの実験データを収集し、これをもとに算定式との比較を行い、さらに算定式の修正を行う。

なお、本論文は文献3)の成果に、その後新たに得られた知見を合わせて取りまとめたものである。文献3)

では、収集されたデータに対して前報の full range 式よりもむしろ粗面乱流式の適合度が良いことから、flow regime 判定条件の見直しの必要性を示唆したが、ここでは各 flow regime 間の補間を行うための重み関数を修正することにより、良好な結果を得ることが出来た。

2. 実験データとその解析方法

本研究で用いた実験データは、交差角 90° で行われた Sleath⁴⁾、Simons et al.⁵⁾、および交差角 90°、108°、72° での Arnskov et al.²⁾ である。せん断応力測定方法はそれぞれ、流速分布(対数則)、シアメーター、ホットフィルムセンサーである。これらのうち、Sleath の実験は厳密には波・流れの実験ではなく、波動の代わりに振動平板による振動流を発生させている。他の二者は平面水槽により交差実験を行っている。実験条件は、波高が 0.6 cm から 14 cm、周期が 1.0 秒から 2.5 秒、水深が 40 cm から 70 cm、定常流の断面平均流速が 12.5 cm/秒から 40.0 cm/秒、ニクラーズの相当粗度が 0.054 cm から 2.025 cm であり、広い実験範囲をカバーしている。

算定式と比較を行う水理量としては、①底面剪断応力最大値、②その作用方向、③流れ方向に作用する平均剪断応力である。

Simons et al.⁵⁾ および Arnskov et al.²⁾ は境界層外縁での波動成分流速の測定も行っているが、ここでは微小振幅波理論により得られる流速を用いて諸量の計算を行った。また、Sleath⁴⁾ の実験は表面波ではなく振動平板によるものなので、実験条件の流速値をそのまま用いた。ただし、Sleath は論文に定常流平均流速の値を記していないので、速度分布図からこれを評価した。

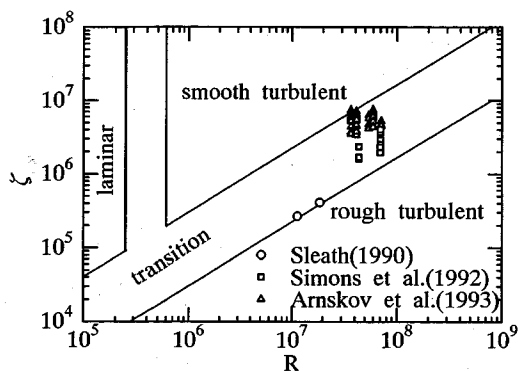


図-1 flow regime

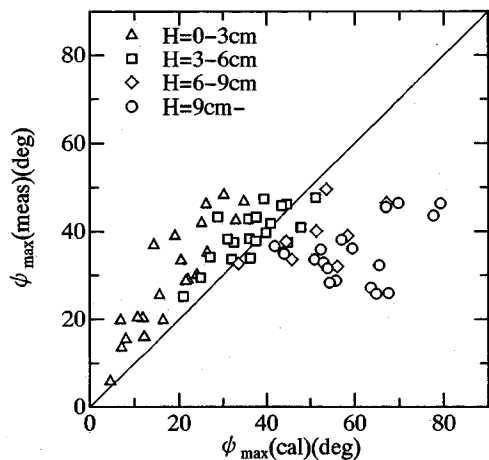


図-3 最大せん断力の作用方向 (前報の算定式による)

Simons et al. のデータには反射率が大きいものが見られた。そこで、30%以上の反射率のデータは解析から除外した。

3. 結果

(1) flow regime

まず、前報の flow regime 判定図により、境界層の領域区分を行った。結果を図-1に示す。ここで、縦軸・横軸の無次元量の定義は式(6)、式(8)で後述する。図によれば、本研究で収集したデータの多くは滑面乱流と粗面乱流の間の遷移域に位置することがわかる。従って、前報で提案された full range 公式が有効に活用される領域にあると言える。

(2) 前報の算定式による計算結果と実験値との比較

共存場での底質移動量の定式化によく用いられる底面せん断応力の最大値 τ_{0max} について、計算値と実験値との比較を図-2に示す。算定には、全ての flow regime

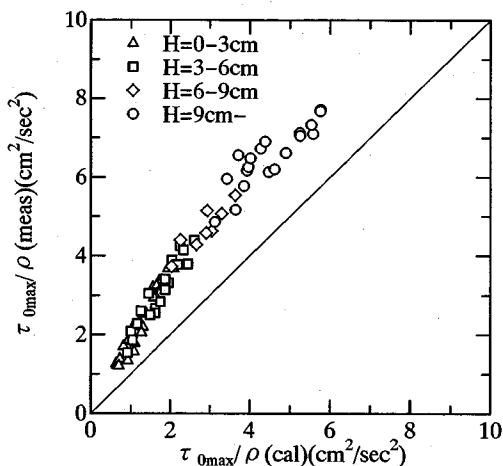


図-2 最大せん断応力 (前報の算定式による)

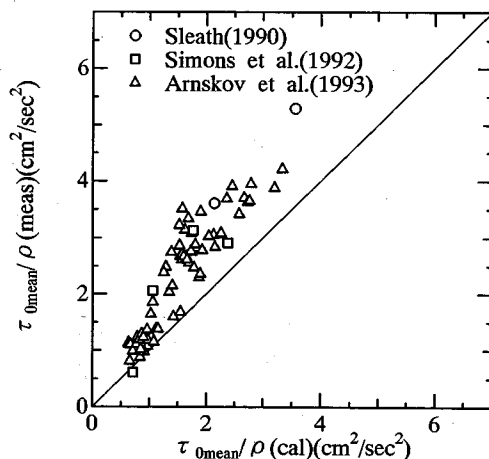


図-4 平均せん断応力 (前報の算定式による)

に適用可能な前報の full range 公式を用いている。この τ_{0max} に関する実測値は Arnskov et al.²⁾ によるもので、他の2報告はこの値の測定を行っていない。図によると、full range 公式による計算結果は全体的に過小評価である。算定式の誤差は最大で50%程度である。

次に、最大剪断応力 τ_{0max} の作用方向 ϕ_{max} について同様な比較を行った結果を図-3に示す。現在までに、この値について理論値と実験値との比較はまったくなされていない。これも、Arnskov et al.²⁾ による値である。波高が低く角度自体も小さい時には、計算値が過小であるものの比較的良い対応を示す。これに対して、波高の増加に伴って計算による角度は増大するが、実測値は40°程度において頭打ちの傾向を示す。この理由として波の非線形性の影響が考えられたので、ストークス波理論に基づく計算も行ったが、改善は見られなかった。

流れ方向の平均剪断応力 τ_{0mean} についての比較を図-

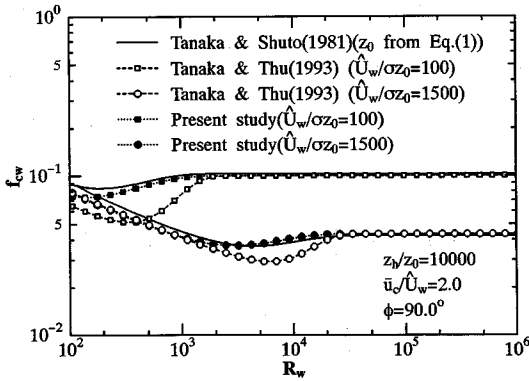


図-5 遷移域の摩擦係数

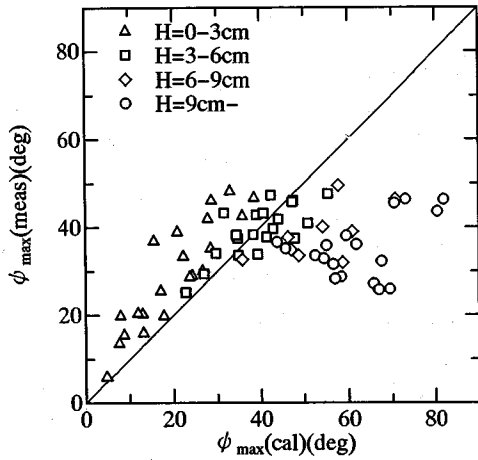


図-7 最大せん断力の作用方向 (修正された算定式による)

4に示す。この量は平均流による砂移動量を定式化する際に重要となる。ここでも図-2と同様に計算値は過小評価となっている。

(3) 前報の算定式の修正

以上の結果によれば、前報の算定式による値と実験値との間には差が見られ、せん断力については過小評価の傾向が見られる。図-1によれば実験値の多くは遷移域にある。著者らが提案した full range 式では遷移域において重み関数を用いて補間を行うが、その式形は前報図-6に示した波動のみの摩擦係数を良好に表現できるように定めたものであり、共存場では特に検証が行われていない。このことから判断すると、前節に示された計算値と実験値との差異の原因のひとつはこの補関数(前報の式(38))の適否によるものと推察されるので、以下ではこの点について検討を行う。

さて、共存場での遷移域の摩擦係数の算定法については Christoffersen and Jonsson⁶⁾が提案を行っている。

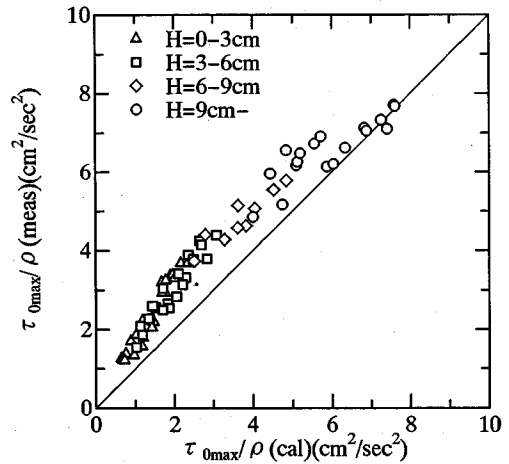


図-6 最大せん断応力 (修正された算定式による)

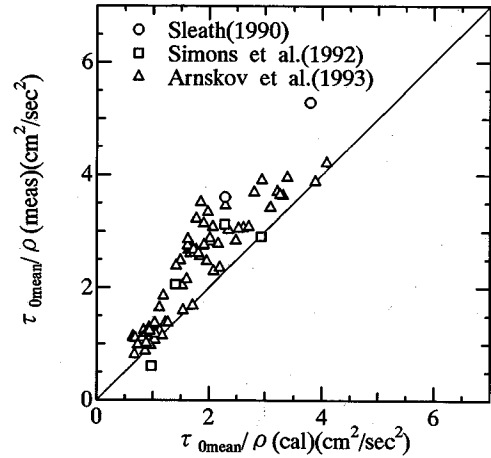


図-8 平均せん断応力 (修正された算定式による)

すなわち、粗面乱流式の粗度長さ z_0 を次式で置き換える。

$$z_0 = \frac{k_s}{30} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{k_s \hat{u}_{cw}^*}{27\nu}\right) \right\} + \frac{\nu}{9\hat{u}_{cw}^*} \quad (1)$$

ここで、 k_s : 相当粗度、 \hat{u}_{cw}^* : 共存場における摩擦速度の最大値、 ν : 動粘性係数である。この方法により得られる算定式は陰形式になってしまうため、前報ではこれを用いていない。

式(1)を Tanaka and Shuto⁷⁾の粗面乱流厳密解に代入して求めた摩擦係数 f_{cw} を図-5に実線で示した。ここで、横軸の R_w の定義は式(6)に後述する。これに対して前報の手法によるものを白抜きの印で示している。式(1)は定常流での知見をもとに定めたものであるため、図-5に示すような相対的に流れ成分が卓越する場合には妥当な結果を与えるものと予想される。図によれば前報の算定式は式(1)によるものに比べ過小評

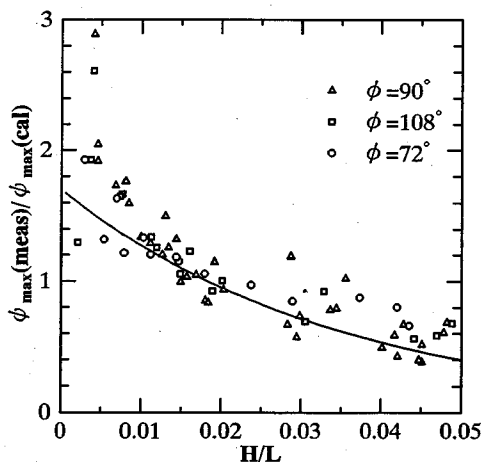


図-9 ϕ_{\max} の計算値と実験値との比と波形勾配の関係

値となることが判る。そこで、Christoffersen and Jonsson⁶⁾によるものとの差が小さくなるように前報の式(38) f_2 を修正することとした。前報での関数 f_2 を以下に示す。

$$f_2 = \exp\left\{-0.0101\left(\frac{R}{R_1}\right)^{2.06}\right\} \quad (2)$$

ただし、前報図-6に見られるように波動のみの場合には上に示した f_2 の修正は必要ないものと判断した。最終的に、以下に示す式を得た。

$$f_2 = \exp\left\{C_1\left(\frac{R}{R_1}\right)^{C_2}\right\} \quad (3)$$

$$C_1 = -0.0101 + 0.347\gamma^{0.2} \quad (4)$$

$$C_2 = 2.06 - 1.09\gamma^{0.05} \quad (5)$$

ここで、

$$R = 500R_c + R_w = 500\frac{\bar{u}_c z_h}{\nu} + \frac{\hat{U}_w a_m}{\nu} \quad (6)$$

$$R_1 = 0.501\zeta^{1.15} \quad (7)$$

$$\zeta = 350\gamma\frac{z_h}{z_0} + (1-\gamma)\frac{\hat{U}_w}{\sigma z_0} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{\bar{u}_c/\hat{U}_w}{1 + \bar{u}_c/\hat{U}_w} \quad (9)$$

であり、 \bar{u}_c : 定常流断面平均流速、 z_h : 水深、 \hat{U}_w : 波動境界層外縁流速の振幅、 $a_m = \hat{U}_w/\sigma$ 、 σ : 角振動数である。上式による算定結果を図-5に黒抜きの印で示した。前報に比べ Christoffersen らの式を用いた値にかなり近くなった。

さて、次に上式のように修正された式による算定結果と実験結果との比較を図-6, 7, 8に示した。図-6, 8については、図-2, 4にくらべ実験値と計算結果との

関係が改善されている。ただし、図-7の角度については図-3とあまり変わらない。図-9に示すように(実験値)/(計算値)の比は波形勾配に依存する傾向を示すが、より詳細な検討はデータの蓄積を待ち、今後の課題としたい。

4. 結 語

本研究では、交差する波・流れ実験のデータを収集し、田中・トゥー¹⁾の full range 式による計算結果との比較を行った。得られた結論は以下のようである。

- (1) 底面剪断応力最大値とその作用方向および一周期平均剪断応力について比較を行ったところ、full range 式を用いると過小評価となることが判った。そこで、前報の式(38)を式(3)で置き換えることを提案した。これにより、実験値との一致度が改善された。
- (2) 最大剪断応力の作用方向に関しては、新たな算定式による改善はほとんど見られない。波形勾配の増大と共に理論値が過大になる傾向を示す。

謝辞：本論文の公表に当たり、小川基金の補助を得た。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 田中 仁, アウン トゥー：全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, No.467 / II-23, pp.93-102, 1993.
- 2) Arnskov, M. M., Fredsøe, J. and Sumer, B. M. : Bed shear stress measurements over a smooth bed in three-dimensional wave-current motion, *Coastal Eng.*, Vol.20, pp.277-316, 1993.
- 3) アーマド サナ, 田中 仁：交差する波と流れによる底面剪断力に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.416-420, 1994.
- 4) Sleath, J. F. A. : Velocities and bed friction in combined flows, *Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng.*, pp.450-463, 1990.
- 5) Simons, R. R., Grass, A. J. and Mansour-Tehrani, M. : Experimental study of waves and currents crossing at right angles, *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng.*, pp.604-617, 1992.
- 6) Christoffersen, J. B. and Jonsson, I. G. : Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion, *Ocean Eng.*, Vol.12, No.5, pp.387-423, 1985.
- 7) Tanaka, H. and Shuto, N. : Friction coefficient for a wave-current coexistent system, *Coastal Eng. in Japan*, Vol.24, pp.105-128, 1981.

(1995. 8. 3 受付)

BOTTOM SHEAR STRESS PREDICTION FOR THREE DIMENSIONAL WAVE-CURRENT BOUNDARY LAYER

Hitoshi TANAKA and Ahmad SANA

The maximum and mean shear stress in the case of three dimensional wave-current coexistent motion are predicted by the full-range equations of Tanaka and Thu (1993). The latest available experimental data are utilized for the comparison. A modification is proposed to improve the predicting capability of the full-range equation in the transitional region.