

波の形を考慮した岸沖漂砂量式の検討

田 中 仁*・吉 田 稔**・塚 原 啓 司***・須 賀 堯 三****

1. 緒 言

波による岸沖漂砂量に関しては、近年多くの研究が行われており、その多くは砂の移動量と底面近傍における水理量（流速・底面せん断力等）との関係を実験的に定めようとしたものである¹⁾。波による底面せん断力の算定には、Jonsson の摩擦係数²⁾が多く用いられている。

Jonsson の式はもともと正弦振動流を対象として得られた式であるが、上記の底質移動量定式化に関する研究においては、非正弦的な波に対しても Jonsson の式を適用している。この様な取扱いにおいては、波の crest-to-trough の高さ・周期・水深が同じであれば、算出される Shields 数は同じ値となり、波形の相違に起因する砂移動現象の特性が全く考慮されないことになる。

本研究では著者の一人により提案された手法³⁾を用い、実測波形の相違をあらわに反映した形で底面せん断力を評価し、漂砂量に対する波形の効果を定量的に検討する。文献 3) に示された新しいせん断力評価手法は、波と流れが共存する場に対しても適用が可能であるが、今回は波のみによる砂移動現象に限定して研究を行った。また、本論文では研究の第一段階として掃流状態での砂移動現象についてのみ考察を行う。

2. 実験方法

実験では、水平床における砂移動および 1/20 勾配を有する二次元海浜での砂移動現象について検討を行った。

水平床の実験において用いた水路は全長 12 m、幅 30 cm、高さ 50 cm の二次元造波水路である。装置の概要を図-1 に示す。実験に使用した底質は平均粒径 0.2 mm および 0.51 mm の二種であり、波浪条件を各種変化させて、合計 15 ケースの実験を行った。図示したように、造波水路の中にかき上げた水平床を作り、その一部を移動床とした。掃流砂の移動方向は岸向きであるので、岸側の固定床に移動して来る砂を捕砂して、漂砂

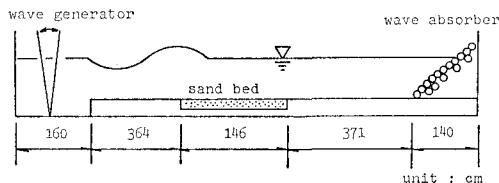


図-1 実験水路

量を求めた。漂砂量の測定に際しては、事前に砂面を十分に平坦にならし、砂漣が発生する前に漂砂量の測定を終えた。なお、沖側の固定床へ移動する砂はほとんど見られなかった。固定床の表面には砂を貼り付けて粗度を増している。

次に、二次元海浜における実験では図-1 に示した水路の岸側にベニヤ製の 1/20 勾配斜面を設けた。斜面上に 3 cm 厚に砂を敷いてから波を作用させ、海浜変形初期における漂砂量を測定した。使用した底質の平均粒径は、0.78 mm である。実験は、1 ケースのみ行われた。実験に使用した波の諸元は、周期 $T=1.52$ sec、沖波波高 $H_0=11.8$ cm であり、沖側の一樣水深部水深は 33.4 cm とした。堀川・砂村ら⁵⁾により提案された C 値は 4.15 であり、本ケースは堆積型の海浜地形に属することが判る。

漂砂量の測定には、箱型のサンド・トラップによる捕砂と地形変化量からの算定を併用した。使用したサンド・トラップは堀川・砂村・柴山⁴⁾により試作された掃流砂用箱型トラップとはほぼ同型のものであり、岸向き漂砂・沖向き漂砂を別々に捕捉し、両者の差から正味の漂砂量を求めた。実験には比較的粗い底質を用いているので、砕波点以深で岸向きの掃流形式の砂移動が生じた。トラップによる捕砂は、砕波点より沖側の測点で掃流砂を対象にして行った。また、サンド・トラップを設置した地点において、漂砂量測定時に同時に当該地点での波形を測定した。海浜地形測定には水陸両用連続式砂面計を用いた。初期地形と 10 分間波を作用させた後の地形との差から漂砂量を算出した。

3. 底面せん断力の算定手法

本研究では波動による底面せん断応力の算定に際し、

* 正会員 工博 宇都宮大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 神奈川県横須賀土木事務所

*** 学生員 宇都宮大学 工学部土木工学科

**** 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部土木工学科

Jonsson の摩擦係数を用いずに、実測波形をもとにせん断力を求める。その手法についてはすでに文献 3) に発表されているので、ここでは簡単な説明と計算例を示すこととする。

任意波形を有する波動のもとでの水粒子速度を推定する手法には、Dean の流れ関数法⁶⁾がある。この方法は、Laplace の方程式および底面・水面での運動学的条件を満足する流れ関数を高波数成分まで加え合わせ、水面での力学条件および実測波形と予測波形とがもっとも良く合致するという条件のもとに、式中に含まれる未定定数を求めるものである。この理論は非粘性流体を対象としたものであり、底面せん断力に関する情報は得られない。そこで、著者の一人により提案された波・流れ共存時の境界層理論⁷⁾をもとに、Dean の流れ関数理論にせん断の効果を加味し、流れ関数 ψ として次式を得る。

$$\begin{aligned} \psi(x, z) = & \frac{L}{T} z - \frac{u_{cw}^{*2}}{\kappa u_{cw}^{*}} \ln \left\{ \left(\frac{z}{z_0} \right) - 1 \right\} \\ & + \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^N \sinh k_n(z - z_0) \{ X(n) \cos k_n x \\ & + X(n+1) \sin k_n x \} \\ & + \text{Real} \left[\sum_{n=1, 3, 5, \dots}^N \frac{i k_n \xi_n}{2 c_n} \frac{H_1^{(1)}(\xi_n)}{H_0^{(1)}(\xi_{n0})} \{ X(n) \right. \\ & \left. - i X(n+1) \} \exp(i k_n x) \right] \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 x : 波の進行方向を正とする水平座標、 z : 底面を原点として上向きを正とする鉛直座標、 L : 波長、 T : 周期、 u_{cw}^* : 定常流成分の摩擦速度、 κ : カルマン定数 ($=0.4$)、 u_{cw}^* : 摩擦速度の最大値、 z_0 : 粗度長さ ($=k_s/30$, k_s : 相当粗度)、 $k_n = (n+1)\pi/L$, $\xi_n = 2e^{\pi i/4} \sqrt{c_n z}$, $\xi_{n0} = 2e^{\pi i/4} \sqrt{c_n z_0}$, $c_n = \sigma_n / \kappa u_{cw}^*$, $\sigma_n = (n+1)\pi/T$, H_0 : 0 次の第一種ハンケル関数、 H_1 : 1 次の第一種ハンケル関数、 $i = \sqrt{-1}$ であり、また Real は [] 内の関数の実部をとることを表す。上式は、Dean の流れ関数と同様に波速で進む移動座標を用いて記述したものである。式中の未知数 $X(n)$, L および T は、Dean の流れ関数と同様に実測波形をもとに最少自乗法により求められる。 L , T について実測値があれば、既知量として扱うことも可能である。もう一つの未知数 u_{cw}^* は簡単な繰返し計算を行うことにより求まる。

計算例を 図-2、図-3 に示した。図は、水平床造波水路において漂砂量測定を行った実験のうちのひとつのケースに対して計算を行ったものである。本ケースの水理条件は、水深 16.5 cm、波高 8.6 cm、周期 1.40 sec である。ただし、計算に際し相当粗度は平均粒径に等しいものとし、また周期は実測値を用いた。図-2 は水面波形の実測値・計算結果およびせん断力の計算結果を示したものである。図-2 下図には、Jonsson の摩擦係数をもとに求めたせん断力の経時変化も示した。ただし、Jonsson の式からは最大せん断力の値しか求まらないので、通常仮定されているようにせん断力が正弦関数の二乗に比例するものとし、さらに表面波形のピークとせん断力のそれとが一致するものとして図を描いた。せん断力の最大値については、Jonsson の式と式 (1) による予測値との間で差が小さいが、経時変化については大きな差異が生じていることがわかる。波が浅海域に達して波形が前傾化してくるにつれて、この差異がますます増大するであろうことが予想される。

図-3 は水平流速の鉛直分布を示したものである。点線は Dean の流れ関数理論による計算値である。式 (1) により算出される流速値は底面の極く近傍を除いて Dean の流れ関数による値と良い一致を示していることがわかる。Dean の流れ関数法は、斜面上の波に対しても底面の近くを除けば、良好な予測値を与えることが知られて

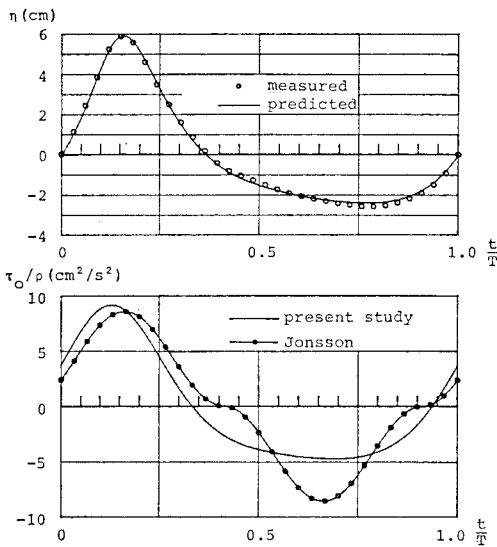


図-2 波形・せん断力の計算例

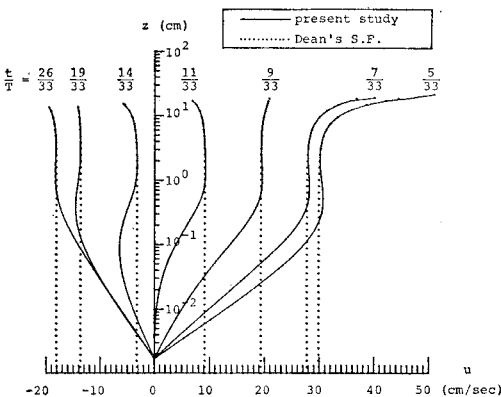


図-3 流速分布の計算例

いるので、式(1)を用いることにより水平床上はもちろんのこと、斜面上のせん断力の推定も可能であると考えられる。

4. 実験結果

(1) 水平床二次造元波水路における実験結果

実験データを従来の手法により整理した結果を図-4に示す。図中の実線はすでに提案されている実験式、式(2), (3), (4)を表しており、これらはそれぞれ Madsen・Grant⁹⁾, 渡辺⁹⁾, 清水ら¹⁰⁾によるものである。

$$\bar{q}_B/wd = 12.5\tau_m^{*3} \dots\dots\dots(2)$$

$$\bar{q}_B/wd = 7(\tau_m^{*} - 0.11)\tau_m^{*0.5} \dots\dots\dots(3)$$

$$\bar{q}_B/wd = 2(\tau_m^{*} - 0.06)\tau_m^{*0.5} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $\bar{q}_B$ ：一周平均の漂砂量、 w ：底質の沈降速度、 d ：底質粒径であり、 τ_m^{*} は、Jonssonの摩擦係数により算定される最大 Shields 数である。実験値は式(4)に比較的近い値を示すが、ばらつきが大きい。

そこで、次に式(1)を用いて底面せん断力を評価して、データ整理を行う。ここでは定常流における流砂現象を参考にし、波動下における時々刻々の漂砂量が次式で表されるものとする。

$$q_B(t)/\sqrt{sgd^3} = \alpha \text{sign}\{\tau^*(t)\} |\tau^*(t)|^m \{|\tau^*(t)| - \tau_{cr}^*\}^n \dots\dots\dots(5)$$

上式中で、 s ：砂の水中比重であり、 $\tau^*(t)$ は式(1)により得られる各位相での無次元掃流力であり、 τ_{cr}^* は移動限界無次元掃流力であり、0.05とした。また、 α は係数であり、実験結果が式(5)にもっとも合致するように定める。

従来の漂砂量に関する研究においては、漂砂量の無次元化に波の周波数を用いたものや、Shields 数のかわり

に摩擦係数を含まない無次元掃流力で表現したものもみられるが、本研究では流砂量式との整合性・波と流れ共存場への拡張の容易さを考慮して、式(5)を採用した。

式(5)において、漂砂量・せん断力はともに岸向きを正とする。式(5)より、一周平均の漂砂量は、

$$\bar{q}_B/\sqrt{sgd^3} = \alpha F \dots\dots\dots(6)$$

となる。ここに、

$$F = \frac{1}{T} \int \text{sign}\{\tau^*(t)\} |\tau^*(t)|^m \{|\tau^*(t)| - \tau_{cr}^*\}^n dt \dots\dots\dots(7)$$

である。ただし、上式の積分は、 $|\tau^*(t)| > \tau_{cr}^*$ となる位相について行うものとする。実測された一周平均漂砂量と、式(7)で定義される値との関係を図-5に示した。ただし、式(7)のべき乗については検討の結果、 $m=0.5$ 、 $n=1.0$ が最適であった。図より、 $\alpha=3.5$ を得る。この値を式(5)に代入し、さらに変形を施せば次式を得る。

$$q_B(t)/u_{*}(t)d = 3.5 \text{sign}\{\tau^*(t)\} \{|\tau^*(t)| - \tau_{cr}^*\} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 $u_{*}(t) = \sqrt{|\tau(t)|/\rho}$ 、 ρ ：流体の密度である。式(8)と河川における流砂量式との整合性を検討した結果が図-6であり、これより式(8)は土研式と近いものであることが判る。したがって、式(8)は、あるいは式(5)は波動場での底面水粒子軌道距離が長い時、矛盾なく定常流場での流砂量式に漸近すると結論できる。

土屋^{11), 12)}は、漂砂量式の中に波動運動の加速度の効果を示すパラメータ d_0/d を内包させるべきであることを強調している。ここで、 d_0 は底面水粒子軌道の全振幅である。本研究の実験範囲($d_0/d=97 \sim 258$)では d_0/d の効果は顕著ではなかった。

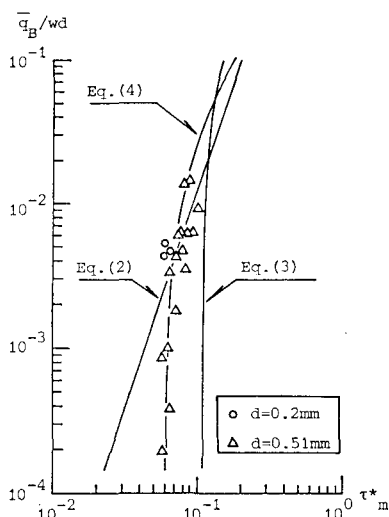


図-4 従来の漂砂量式との比較

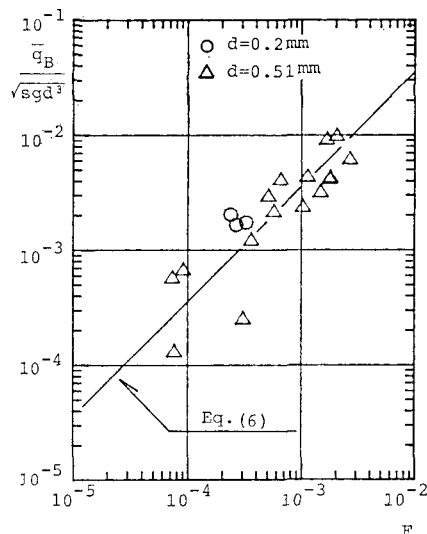


図-5 漂砂量と F (式(7)) との関係

- (1) Sato et al. $n=0.015$
- (2) Sato et al. $n=0.025$
- (3) Ashida and Michiue $u_{*e}/u_* = 1.0$
- (4) Ashida and Michiue $u_{*e}/u_* = 0.5$
- (5) Einstein $u_{*e}/u_* = 1.0$
- (6) Einstein $u_{*e}/u_* = 0.5$
- (7) Kalinske
- (8) Brown
- present study



図-6 式 (8) と各種流砂量式との比較

(2) 1/20 勾配二次元海浜における実験結果

二次元海浜の初期地形及び 10 分後の地形を示したものが図-7 上段である。図中, B.P. は砕波点を示しており, 砕波形式は plunging 型であった。図-7 上段の結

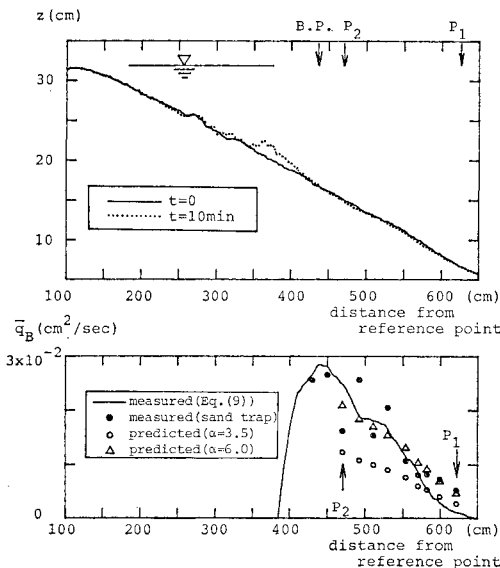


図-7 二次元海浜の地形変化と漂砂量

果をもとに, 次式により漂砂量を算定した結果が 図-7 下段の実線である。

$$\bar{q}_B = -(1-\lambda) \int_{x_0}^x \frac{dz}{dt} dx \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに, λ : 底質砂の空隙率, x_0 : 地形変化限界点, Δz : 地形変化量, Δt : 地形変化に要した時間である。実験において, 砕波点以深での砂移動はほぼ二次元的であったが, plunging point 近傍では側壁近くが激しく掘れ, 地形の三次元性が顕著であった。そこで, 漂砂量を算出する際には, 沖側から数値積分を行い, 砕波点以浅については漂砂量分布を図示していない。図中の黒丸はサンドラップにより測定された漂砂量を示しており, 実線で示した値とほぼ一致していることが判る。

図-7 に示した測点 P_1, P_2 における波形・せん断力を示した結果が 図-8, 図-9 である。沖側の測点 P_1 に

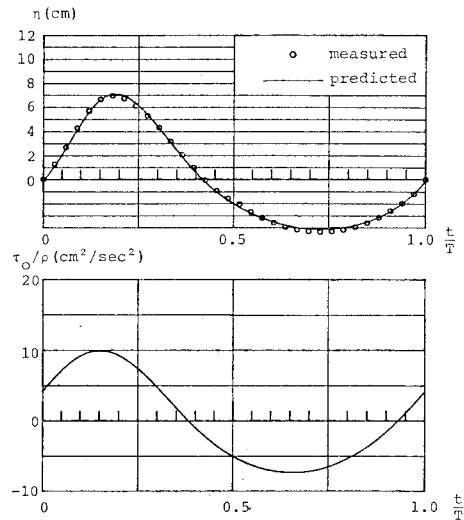


図-8 測点 P_1 での波形・せん断力

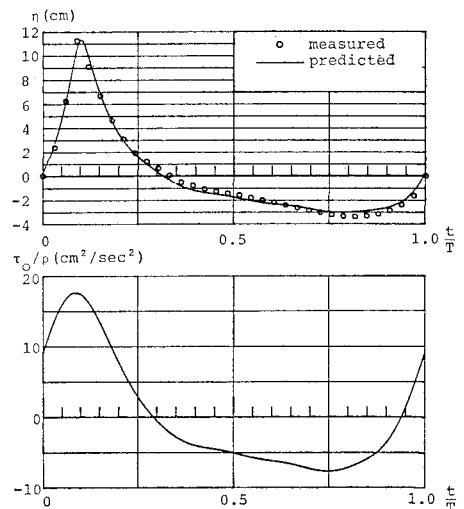


図-9 測点 P_2 での波形・せん断力

おいては、波形は波の峰をはさんではほぼ対称であり、せん断力も同様な波形を有している。一方、碎波点に近い測点 P_2 では波の非対称性が顕著であり、せん断力の波形もこれに対応したものになっている。同様な計算を他の測点に対しても行い、得られたせん断力の値を式(6)に代入して、一周平均の岸向き漂砂量を求めた。図-7下段の白丸が計算結果を表している。なお、岸寄りの2つの測点については計算結果を示していない。これは、式(1)の未知数 $X(m)$ の算出に際し、計算が数値的に発散し、収束値が得られなかったことによる。計算値と実験値との対応はあまり良好ではない。特に、碎波点近くにおいて差異が大きいうである。岸近くでは波形の急激な立ち上がりに伴う加速度の効果が大きく、その結果、実測値が大きくなったものと考えられる。もともと図-5に示したデータ自体、式(6)の係数 α の値にして2から6の範囲にばらついており、 $\alpha=6$ にすると、図-7において実測値と計算値との対応が著しく改善される(図中の△印)。非線型性の強い波の場合、土屋^{11),12)}の提唱するパラメータ d_0/d により加速度の効果を十分に表現することは困難であると思われるが、いずれにしても、式(6)の係数 α の中になんらかの形で加速度の効果を加味する必要があると考えられる。

5. 結 語

本研究では、著者の一人により提案された新しいせん断力の評価手法を用いて、波による砂移動現象について検討を行った。今回得られた主要な結論は以下の通りである。

(1) 波によるせん断力について、従来の手法による予測値と新しい手法によるそれとを比較した。その結果、せん断力の最大値については両者が近い値を与えるが、時間波形に大きな差異を生じることが判った。新しい手法を用いることにより、表面波形に対応したせん断力を求めることが可能である。

(2) 水平床上の波による漂砂量式(掃流漂砂量)とし

て式(5)の関数形を仮定し、実験により係数 $\alpha=3.5$ を得た。一周平均の漂砂量は式(6)、(7)で与えられる。

(3) 斜面上の砂移動現象については式(6)、(7)の適合性は十分ではなかった。これは、碎波直前においては加速度の効果が無視し得ないためと考えられ、この点についてはさらに検討を必要とする。

最後に、本研究に対し、文部省科学研究費の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、本間 仁(監修)・堀川清司(編): 海岸環境工学——海岸過程の理論・観測・予測方法, 東京大学出版会, pp. 170~190, 1985.
- 2) Jonsson, I. G.: Wave boundary layer and friction factors, Proc. 10th Coastal Engng. Conf., pp. 127~148, 1966.
- 3) 田中 仁: 任意波形を有する波動下での水粒子速度と底面せん断応力の算定手法に関する研究, 土木学会論文集, pp. 181~187, 1987.
- 4) 堀川清司・砂村継夫・柴山知也: 二次元海浜変形に関する実験的研究——沖浜帯における漂砂量測定法——, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 170~174, 1977.
- 5) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋: 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 329~334, 1975.
- 6) Dean, R. G.: Stream function representation of non-linear ocean waves, Jour. of Geophys. Res., Vol. 70, No. 18, pp. 4561-4572, 1965.
- 7) Tanaka, H and N. Shuto: Friction coefficient for a wave-current coexisting system, Coastal Engineering in Japan, Vol. 24, pp. 105~128, 1981.
- 8) Madsen, O. S. and W. D. Grant: Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th Coastal Engng. Conf., pp. 1093~1112, 1976.
- 9) 渡辺 晃: 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 285~289, 1981.
- 10) 清水隆夫・斉藤昭二・丸山康樹・長谷川寛・鹿島遼一: 大型造波水路実験による岸沖漂砂量分布のモデル化, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 311~315, 1985.
- 11) 土屋義人・上田康裕・大下哲也: 掃流漂砂量について, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 306~310, 1984.
- 12) 土屋義人: 漂砂量則について, 1986年度(第22回)水工学に関する夏期研修会講義集, pp. B-5-1~B-5-15, 1986.