

重合波浪場における漂砂量の評価法に関する研究

佐藤 慎司*・光信 紀彦**・榎本 裕***

1. 序 論

構造物周辺の複雑な波浪場における漂砂現象を理解するためには、多くの成分波が重合し底面付近の水粒子が楕円軌道を描く場における砂移動機構を理解する必要がある。このような重合波浪場では、底面付近の水粒子の平面的な運動に伴い特徴的な境界層が形成されるため、底面微地形や砂の移動形式は単一進行波のもとでのそれらと大きく異なっていると考えられるが、このような場における漂砂現象を扱った研究は従来ほとんど無い。そこで本研究ではまず防波堤に波が斜めから入射する場合を対象として、防波堤前面に形成される重合波浪場のもとでの砂移動機構を実験により把握したうえで、重合波のもとでの漂砂量を評価する方法を検討した。実験条件として斜め入射重複波を選んだのは、斜め入射波条件における防波堤前面では、いわゆる三角波の形成により複雑な波動場がみられるとともに、防波堤に垂直方向には重複波性の砂移動、平行方向には進行波性の砂移動がみられ、重合波浪場に特徴的な微地形と砂移動形態が観察できるからである。

このような斜め入射重複波浪場の特性に関して、Hsu ら (1979) は Stokes 波型の摂動展開を行ない斜め入射完全重複波に対する 3 次近似解を導いた。また底面に発達する波動境界層の条件に関しては、Hsu ら (1980) により境界層内の流速分布と質量輸送速度の表示が導かれている。さらに防波堤前面における地形変化に対しては、Silvester (1986) や入江ら (1986) により実験と現地調査の両面から地形変化の特性と波浪・底質条件との関係が検討されており、比較的短期間で平衡に達する防波堤に直角方向の砂移動とともに長期にわたって継続する防波堤に平行方向への砂移動が存在することが報告されている。しかし、斜め入射条件下での漂砂現象の解明は二次元直角入射重複波条件に対するものに比べて十分でなく、砂移動機構の詳細な検討や漂砂量の定量的な評価はなされていない。

本研究では、平面水槽において広範な斜め入射波条件のもとでの移動床実験を行ない、防波堤前面でみられる重合波浪場、底面流速場と地形変化を詳細に測定した。そして、底面近傍の波動軌道流速や質量輸送速度と砂漣形状および net の漂砂量との関係を明らかにした。さらに砂漣による浮遊砂の巻き上げ過程を考慮した重合波浪場に対する砂輸送モデルを提案し、実験結果によりこのモデルの適用性を検証した。

2. 斜め入射重複波に対する移動床実験

実験は 9×9 m の平面水槽に図-1 に示す様に長さ 5 m の防波堤型を波の入射角 α が 30° , 45° , 60° となる様に設置して行なった。防波堤前面の固定床部分に幅 40 cm, 長さ 120 cm, 深さ 2 cm のトレイを埋め込み、粒径がよくそろった砂 (中央粒径 $D=0.16$ mm) を平坦に敷きならして観測部とした。トレイの周辺部分は流れを乱さぬ様、勾配 1/5 の斜面となっている。観測部における水深は 12-16.5 cm とし、波の周期を 0.65-1.41 s, 防波堤の反射率を 0.2-1.0 とし、波高を調節することにより移動限界付近から活発な砂移動が生じる条件まで広範な条件のもとで合計 50 ケースの実験を行なった。水槽内の水温は $3-12^\circ\text{C}$ であった。また、水槽の壁面には

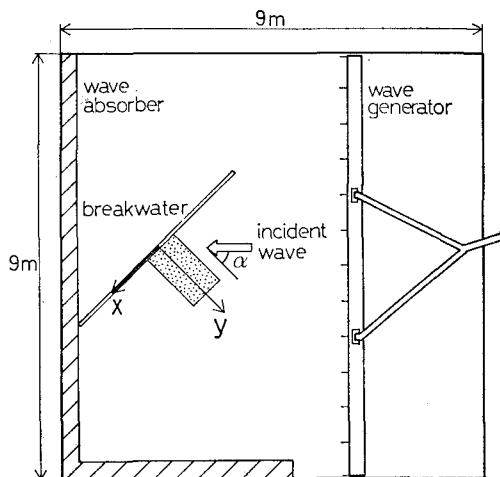


図-1 実験装置

* 正 会 員 工 博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 学生会員 横浜国立大学大学院工学研究科

*** 東京都庁

波の多重反射を防ぐために十分な量の消波材を設置した。なお、本論文では図-1に示す様に防波堤に沿って波の進行方向側に x 軸をとり、観測部中心線上に y 軸をとることとする。

実験は以下に述べる手順で行なった。まず、トレイを二分する様に $x=0$ の位置にステンレス製の仕切り板を挿入し、その左右の領域に等量の砂を平坦に敷きつめた。そして、仕切りを取り除いて波を作用させ、容量式波高計で防波堤に垂直な断面における波高分布を計測するとともに砂の移動形式と移動方向を観察した。砂漣が発達し定常状態における砂移動が十分に継続した時点で波の作用を停止し、地形変化、砂漣形状を克明に記録した。波の作用時間は $\alpha=30^\circ$ の条件では 10-25 分、 $\alpha=60^\circ$ では 15-50 分程度であった。地形変化と砂漣の形状はグリスを塗った OHP シートを砂面に鉛直に挿入して、静かに取り出した後シートに付着した砂粒子の痕跡から測定した。その後再び $x=0$ の位置に仕切りを挿入して観測部を二分し、さらに防波堤平行方向にも 20 cm ごとに別の仕切りを挿入することにより、防波堤から 20 cm ごとの左右領域内の砂を別々に回収した。回収した砂はメスシリンダー内でよく締め固めた後その体積を測定し、これらから防波堤に垂直および平行方向の net の局所漂砂量 q_x , q_y を評価した。投入した砂の総量と回収した砂の総量は一般的には一致せず、漂砂量の評価に実験誤差が生じることになる。しかし、顕著な砂移動がみられた条件に対して、評価された漂砂量に対する誤差の割合は高々 15% であり、高い精度で漂砂量が測定できていることを確認した。

斜め入射条件における防波堤前面では底面近傍の水粒子は防波堤からの距離に応じて円、楕円、直線の軌道を描いて運動することが観察されたが、さらに二次的な質量輸送や波の非線形性の影響等により複雑な運動がみられた。そこで上記の一連の移動床実験に加えて、斜め入射条件における底面付近の流速変動の測定実験も行なった。流速の測定は、観測部をステンレス板でおおい固定床としたうえで二成分小型電磁流速計を用いて行ない、底面近傍の流速振幅とオイラー的な質量輸送速度を評価した。

3. 防波堤前面における波浪場と底面流速場

図-2 は完全反射条件における防波堤に垂直な断面の波高分布と地形変化を示したものである。波高分布の図の破線は微小振幅波理論による理論値であり、実線は Hsu ら (1979) が導いた三次近似解によるものである。今回の実験では、ほとんどの条件において、防波堤前面の波動場は Hsu ら (1979) が導いた三次近似解で精度良く評価することができることが確認された。ただし、波の

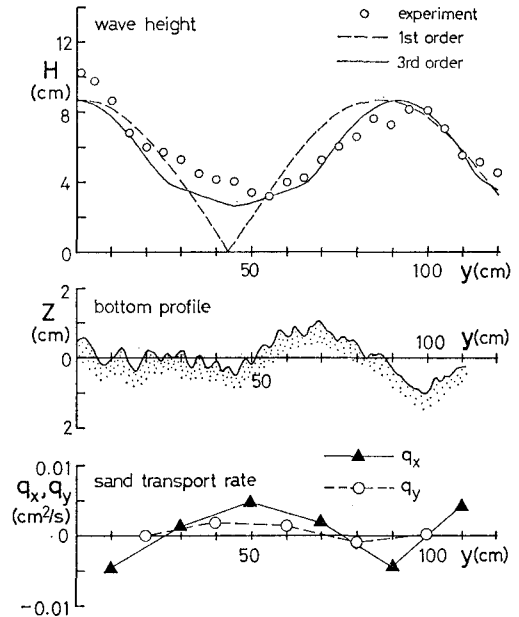


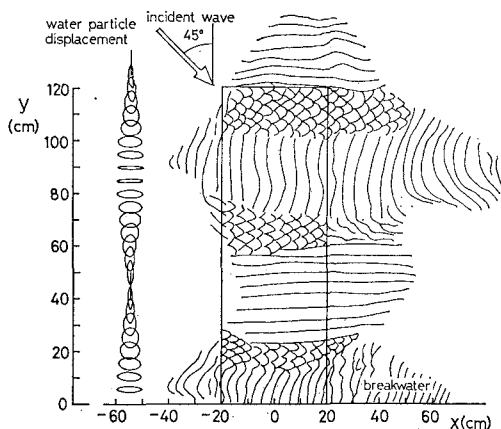
図-2 防波堤前面の波高分布、地形変化と漂砂量

入射角が浅い $\alpha=60^\circ$ の条件で波高が大きいケースでは、防波堤に沿って非線形性の強い沿い波がみられ、底面地形もそれに応じて単一進行波のもとでの地形変化と類似な特性を示す領域が多くみられた。

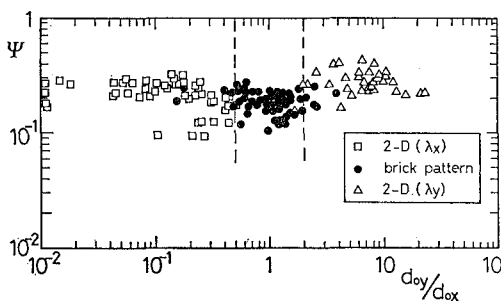
砂の移動状況を観察したところ net の輸送量とその方向に大きな影響を与えているのは、底面近傍の質量輸送速度と波動流速波形の非対称性であると思われた。流速の実測値と理論値を比較したところ、波動流速の波形については Hsu ら (1979) の理論解と良く一致していることが確かめられた。また、実測流速の定常成分、すなわちオイラー的な質量輸送速度は、微小振幅波理論によると波の腹に当たる部分に収束しつつ波の進行方向へ向かう流れがみられることになる。実測値と理論値を比較したところ、実測値の方がやや小さくなるが分布形状は定性的に一致していることがわかった。これらの結果から本論文では、底面近傍の流速変動等の計算には Hsu ら (1979) の三次近似理論を用いることにした。

4. 砂漣の形状特性と砂移動機構

図-2 の下段には回収した砂の量から評価した漂砂量の x , y 成分を示してある。防波堤に垂直な方向にはほとんどのケースで腹から節へ向かう砂移動が卓越した。一方、防波堤に平行方向には波の腹に相当する部分では波の進行と逆方向への輸送がみられたのに対し、波の節の部分では波の進行方向への砂輸送が卓越した。漂砂の方向を規定する要因として、質量輸送速度のみを考えると全域で波の進行方向への砂移動 ($q_x > 0$) が観察されるはずで、しかも腹の位置で漂砂量が最大となるはずであ



図—3 砂漣の発達状況



図—4 砂漣の分類

る。実際には腹の位置で逆方向への砂移動 ($q_x < 0$) が観察されており、これは波の非線形性による流速波形の非対称化と砂漣の存在を考慮する必要があることを示している。

図—3 は防波堤前面に見られた砂漣の形状を示したものである。図の左側には微小振幅波理論により計算される底面付近の水粒子の軌跡が示してある。防波堤前面には波の重合の形態に応じて、図に示されている様な3つのタイプの砂漣が交互に発達した。すなわち、防波堤に垂直な峰線を持つ二次元的な砂漣、二つの峰線が斜交するいわゆる brick pattern 状の三次元砂漣、防波堤に平行な峰線を持つ二次元砂漣である。砂漣の形状と水粒子の軌跡を合わせ見ると水粒子の軌跡の形状と砂漣の発達領域とは明瞭な相関が見られる。そこでこれら三種類の底面形状が発達したそれぞれの地点におけるシールズ数 Ψ と水粒子軌道の長軸と短軸の比との関係を示したのが図—4 である。ここで、シールズ数は流速の絶対値の最大値 u_m を用いて次式のように定義した。

$$\Psi = \frac{f_w \cdot u_m^2}{2sgD} \quad (1)$$

ここで、 s は底質の水中比重、 g は重力加速度であり、 f_w は流速振幅に流速の最大値を用い、軌道振幅に変位の最大値を用い、底質粒径を粗度として計算される Jonsson

の摩擦係数である。図より軌道長軸の長さが短軸の長さの2倍以上になると二次元的な砂漣が形成され、それ以外の領域では brick pattern が発達することがわかる。

さらにこれらの砂漣の形状を解析した結果、二次元砂漣、brick pattern 状砂漣ともに、その波長 λ_x , λ_y は底面水粒子軌道の直径 d_{0x} , d_{0y} を用いて次式により評価できることがわかった。

$$\lambda_x = 0.6d_{0x}, \quad \lambda_y = 0.6d_{0y} \quad (2)$$

ここで brick pattern 状の砂漣の波長 λ_x , λ_y は、 x , y それぞれの方向において隣り合う2つの峰の間の距離として定義した。また砂漣の波形勾配はシールズ数を用いて評価できるが、brick pattern の波形勾配は二次元砂漣に比べて約25%小さくなり、次式で評価できる。

$$\eta/\lambda = 0.15 \quad (\text{二次元砂漣}) \quad (3)$$

$$\eta/\lambda = 0.11 \quad (\text{brick pattern}) \quad (4)$$

ここで λ は λ_x と λ_y の大きい方とした。

顕著な砂移動がみられた条件ではほとんど全面にわたって浮遊砂が観察されたが、brick pattern の発達領域では顕著な浮遊砂雲は形成されず、浮遊砂の舞上がり量も少なかった。これは brick pattern の形成領域では水粒子がほぼ円に近い軌道を描いているため、一般に流速の絶対値が小さくなることと砂漣背後に剝離渦が効率的に形成されないことが原因である。

5. 重合波浪場における砂移動の数値モデル

波が重合する場合での漂砂量を評価することを目的として、砂漣が存在する場合の砂移動機構に立脚した数値モデルを作成した。砂の移動量とその方向を評価するためには、まず底面付近の流体運動と砂漣の形状を評価することが必要となる。本実験で対象とした斜め入射重複波に対しては、底面近傍の流速は Hsu ら (1979) が導いた第3次近似解を用いて計算した。流速を積分して水粒子の変位を計算し、水粒子軌道の全振幅 d_{0x} , d_{0y} を評価した。そしてこれらから (2) ~ (4) 式と図—4 を用いて砂漣の特性と形状を評価した。

砂の移動機構をモデル化するにあたっては水粒子が平面的な軌道を運動する場合への拡張が容易であることを考慮しつつまず二次元波浪場での砂移動をモデル化した。浮遊砂濃度について Nielsen (1986) は底面における時間平均浮遊砂濃度 C_0 が次式で表わされることを示した。

$$C_0 = 0.005 \Psi r^3 \quad (5)$$

ここで、 Ψ_r は砂漣による流れの加速効果を考慮したシールズ数で、次式で定義される。

$$\Psi_r = \Psi / (1 - \pi \eta / \lambda)^2 \quad (6)$$

ここで砂漣頂から渦に取り込まれる砂の量 $m_0(t)$ を評価するために、時々刻々の流速値を用いて各瞬間のシール

ズ数 $\Psi(t)$ を定義し、 $m_e(t)$ は次式の様にこのシールズ数の 3 乗に比例すると仮定する。

$$m_e(t) \sim \Psi(t)^3 \quad \dots\dots\dots (7)$$

そして上式で計算した一周期にわたる浮遊砂連行量が (5) 式で評価される一周期間の連行量と等しくなる様に比例定数の値を決めると砂漣頂から渦に取り込まれる単位時間の砂の量は単位幅あたり次式で表わされることになる。

$$m_e(t) = 0.016 \cdot \Psi_r(t)^3 \cdot w_s \cdot \lambda \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\Psi_r(t) = \Psi(t) / (1 - \pi\eta/\lambda)^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 w_s は底質の沈降速度である。砂漣頂から放出されて渦にとりこまれる砂は砂漣の上流側斜面を駆け上ってきたものであるが、ここでは単純化してすべて砂漣頂から供給されるものとする。渦に巻き込まれた砂は浮遊砂雲を形成するが、ここでも単純化して砂漣頂から放出された砂は図-5 に示した様に砂漣背後のある一点に集中すると考える。その位置は砂漣の存在を無視した xz 平面で $u > 0$ の時には $(\eta, 1.5\eta)$ 、 $u < 0$ の時には $(-\eta, 1.5\eta)$ とした。砂漣頂から放出された砂粒子はこの点に集中し、流速が反転するまでは単純に静水中の沈降速度で鉛直方向に沈降する。流速が反転するとその時浮遊状態の砂粒子は全て再び $(\pm\eta, 1.5\eta)$ の位置に集中し、そこから主流部へ放出され以後主流部の流れに乗って輸送されつつ沈降するものとした。このように考える理由は、流速の反転時には渦の放出と乱れ的作用により浮遊砂の強い混合が起こるからである。浮遊砂が主流部に放出された後の沈降過程の計算では主流部の流れとして、波動理論から計算される流速に層流境界層理論で計算される境界層外縁のオイラー的な質量輸送速度を加えたものを用いた。この様にして一周期を通じて連行される浮遊砂の沈降位置をそれぞれの連行量で重みを付けて平均することにより砂の平均的な輸送距離を評価した。これを砂漣の波長 λ と周期 T で割れば net の漂砂量を求めることができる。

主流部の水粒子が平面的な運動をする重合波浪場に対しても同様な考え方で net の漂砂量 q_x, q_y が評価でき

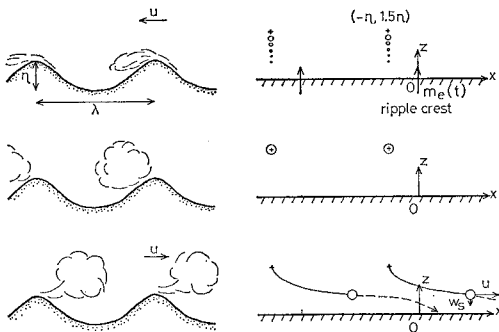


図-5 砂移動のモデル化

る。ただしこの場合には前節で述べた様に、条件によって発達する砂漣の卓越方向が異なるため、それぞれの条件に対して浮遊砂が渦に取り込まれる位置を適切に与える必要がある。

図-6 は本モデルによって非対称振動流のもとでの漂砂量を計算したものである。実測値は佐藤・堀川(1984)が振動流装置を用いて測定したもので、底質粒径は 0.18 mm、周期は 3-5 s で、Stokes 波理論と cnoid 波理論から計算される底面流速波形のもとで観測された net の漂砂量である。単純なモデルであるが広い条件に対して実測値と計算値との対応は良好である。

図-7 は直角入射条件の完全重複波に対する計算例をまとめたものである。縦軸には入射波の底面流速振幅と底質の沈降速度との比をとり、横軸には入射波の諸元から計算されるアーセル数をとっている。計算条件は水深 8-30 cm、周期 0.8-2 s、腹の位置での波高 5-20 cm、底

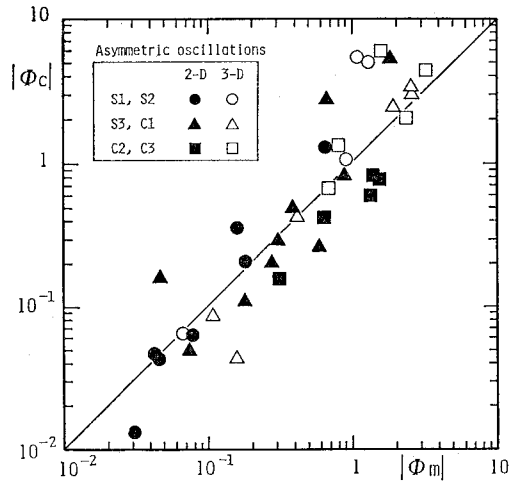


図-6 非対称振動流に対する計算値と実測値

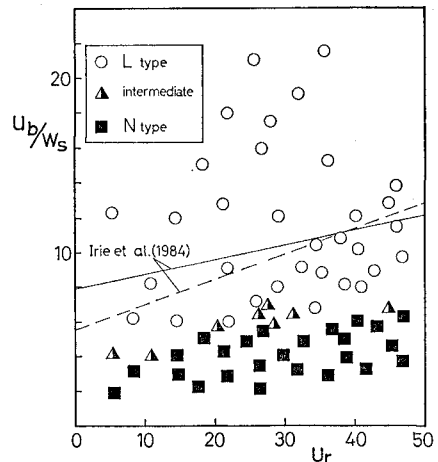


図-7 重複波のもとでの底面地形の分類

質粒径 0.1-0.5 mm の条件の中から選んだ。図中○印は net の砂移動が節から腹へ向かういわゆる L タイプとなったものであり、■印は腹から節へ砂移動が生じる N タイプとなったものである。また実線は入江ら (1984) が移動床実験結果に基づいて導いた両タイプの境界であり、破線は固定床実験条件における境界を示している。図からわかる様に本モデルによる計算例では L タイプの領域がやや大きめとなるが、底面流速と沈降速度の比が大きくなると N タイプから L タイプに移移するという従来の実験結果を合理的に解釈できる。

図-8 は本モデルによる漂砂量の計算値と前述の斜め入射重複波のもとでの実験結果とを比較した一例である。実験結果と計算結果は良好に対応しており、重合波浪場に対しても、本モデルにより漂砂量を精度良く計算できることが確認された。

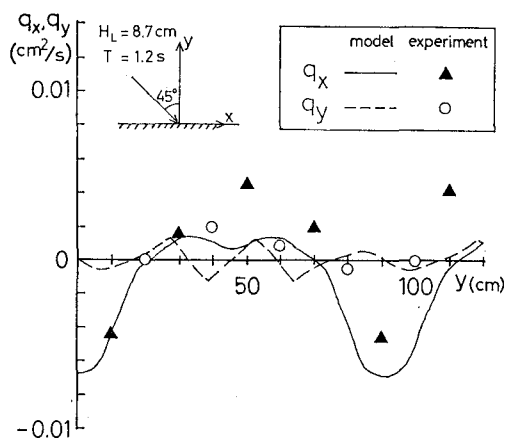


図-8 斜め入射重複波条件に対する計算値と実測値

6. 結 言

本研究では波が重合する場での砂移動現象を実験により定量的に解明し、底面に砂澱が発達している条件に対する簡単な数値モデルを作成した。その成果は本論文で具体的な対象とした防波堤前面のみならず、一般的に多方向の波が重合している場のもとでの漂砂現象を考える際にも極めて有用であると考えられる。また、作成した数値モデルは底面付近の流速波形のみを入力条件として用いているため、波・流れ共存場や不規則波浪場への応用も比較的容易であると考えられる。さらに一般的な重合波浪場への適用とともに今後の検討課題としたい。

本研究は文部省科学研究費奨励研究 (A) No. 01750499 (佐藤慎司) による研究成果であることを付記する。

参 考 文 献

- 入江 功・近藤隆道・赤石正廣・寺崎賢次 (1984): 重複波による防波堤前面での海底洗掘, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 350-354.
- 入江 功・栗山善昭・浅倉弘敏 (1986): 重複波による防波堤前面の海底洗掘及びその対策に関する研究, 港研報告, 第 25 巻第 1 号, pp. 3-86.
- 佐藤慎司・堀川清司 (1984): 非対称振動流下における砂澱上の砂移動に関する実験的研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 286-290.
- Hsu, J. R. C., Y. Tsuchiya and R. Silvester (1979): Third-order approximation to short-crested waves, J. Fluid Mech., Vol. 90, Part 1, pp. 179-196.
- Hsu, J. R. C., R. Silvester and Y. Tsuchiya (1980): Boundary-layer velocities and mass transport in short-crested waves, J. Fluid Mech., Vol. 99, Part 2, pp. 321-342.
- Nielsen, P. (1986): Suspended sediment concentrations under waves, Coastal Engineering, Vol. 10, pp. 23-31.
- Silvester, R. (1986): The influence of oblique reflection on breakwaters, Proc. 20th Conf. on Coastal Eng., pp. 2253-2267.