

大型海洋構造物周辺の砂移動と平均流

東江隆夫*・伊藤一教**・勝井秀博***・灘岡和夫****

1. はじめに

大型海洋構造物周辺の海底地形変化について、筆者ら(1985)は、周辺の砂の移動限界や洗掘パターンを示した。また、斎藤、佐藤、柴山(1988)は、渡辺ら(1984)の3次元海浜変形モデルを基にした海底地形変化の数値シミュレーションを実施した。しかしながら、シミュレーションは、実験結果を十分に説明できたとは言い難い。

一方、勝井ら(1990)は、田中、首藤(1984)の理論を拡張して、大型円柱周辺の底面せん断力と砂の移動限界を比較した上で、漂砂量について、せん断力の場所的勾配に比例する漂砂量算定方法の必要性を示した。以上のように、大型海洋構造物周辺の海底地形変化については、従来の理論では説明できない部分が多く、その砂の移動機構についての研究の必要性が求められてきた。筆者ら(1991)は、大型海洋構造物周辺の砂の移動機構を把握する目的で、固定床を用いた基礎的な実験を行ない、滑面上での、質量輸送速度の理論を検証するとともに、平均流の鉛直構造と砂の移動機構について考察した。しかし、それらは滑面上での水粒子の動きについてであり、砂粒子の運動についての定量的な議論はなされていない。また、平均流の構造についても十分な検討がされているとは言い難い。

本研究では、まず、滑面上での砂粒子の動きについて、数値シミュレーションを行ない、それにより、滑面上での砂の移動機構を明かにする。次に、砂澱面上での平均流の空間的な分布を調べ、その特性について議論する。

2. 実験方法

実験は、図-1に示すように平面水槽(長さ35.5m、幅17m、水深30cm)内に径1.17mの大型円柱を設置して、行なった。水槽底面には波の条件に応じた固定床砂澱面を作成し、ケイ砂7号($d_{50}=0.15\text{mm}$)および

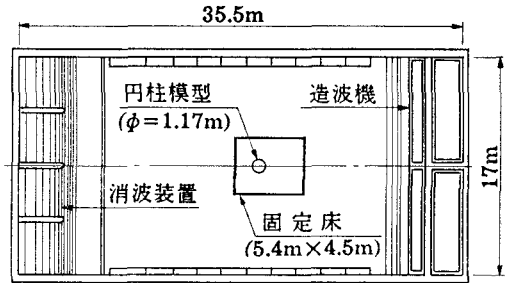


図-1 実験装置

エスレンビーズ($d=2.0\text{mm}$, 比重1.02)の波による砂の移動を観察した。入射波は、波高10cm、周期1.0秒および2.0秒の規則波である。平均流速の測定は、電磁流速計とレーザー流速計を併用した。電磁流速計では、円柱周辺の92点を水深3(あるいは4)、5、10、15、20cmの点で測定した。計測時間は2分間とし水槽内に発生する周期30秒ほどの振動成分は取り除いた。レーザー流速計では、円柱近傍の流れの鉛直構造を詳細に調べた。測定点は、波の進行方向を0度として、60、90、120、150度の4点である。

3. 滑面上の砂粒子の動き

3.1 砂粒子の運動シミュレーション法

筆者ら(1991)は、滑面上でのケイ砂7号の移動形態が移動床を用いた地形変化の実験と異なることを示した。ここでは、その原因を説明する目的で、滑面上の砂粒子が、実際どのような運動をしているか数値シミュレーションによって調べた。

砂粒子が、底面を掃流状態で移動すると仮定した時、砂粒子の運動を表す方程式は、入江、灘岡ら(1984)によれば次式となる。

$$\frac{dx_s}{dt} = u_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{du_s}{dt} = \frac{3C_d}{4d(s+C_m)} |u-u_s|(u-u_s) + \frac{1}{s+C_m} \frac{dU_w}{dt} + \frac{C_m}{s+C_m} \frac{du}{dt} + \frac{s-1}{s+C_m} \mu_f \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 x_s : 砂粒子の水平座標、 u_s : 砂粒子速度、 C_d :

* 正会員 MS 大成建設(株) 技術研究所

** 正会員 工修 大成建設(株) 技術研究所

*** 正会員 博士 大成建設(株) 技術研究所

**** 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

砂の抗力係数, C_m : 砂の仮想質量力係数, d : 砂の粒径, s : 砂粒子比重, u : 水粒子速度, U_w : 境界層外縁での水粒子速度, μ_s : 摩擦係数である. 式中, 太字で示されているものは, ベクトル量である.

砂粒子の移動の開始は, 式 (2) の右辺において, 第1項, 第2項および第3項の和が, 第4項よりも大きくなったときとし, その時点で摩擦係数を静止摩擦係数から動摩擦係数に変えている.

粒子に作用する流れは, Cater et al (1973) による境界層内での2次のオーダーまでの理論値を用いた. したがって, 1次のオーダーについては正弦波であり, 2次のオーダーの量は定常流 (オイラーの質量輸送速度) で

ある. この値が正しいことは, 筆者ら (1991) によって間接的に確認されている.

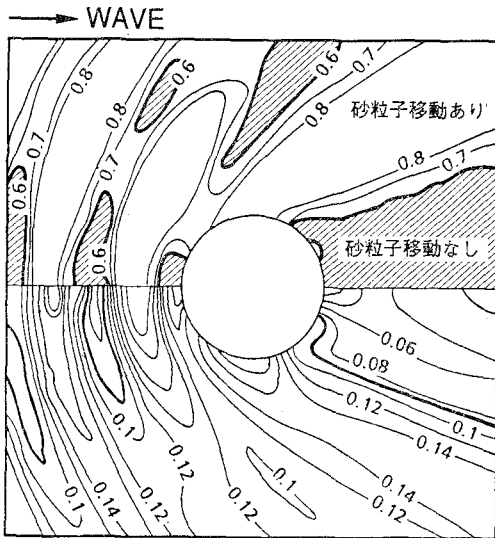
C_d および C_m は, それぞれ 0.5 とし, 流速の作用高さは, 砂粒子の半分の位置とした. ただし, 境界層厚さは層流境界層理論から求められる $\delta = 2.4 \text{ mm}$ (周期1秒) 及び 3.4 mm (周期2秒) としている. 砂粒子の粒径は 0.15 mm であるため, 砂粒子は層流境界層厚さに比べて非常に小さい.

静止摩擦係数は, 底面せん断力の計算結果あるいは前年度の実験結果と比較して決定した. 図-2 (a) 及び (b) は, 摩擦係数を変化させたときの砂の移動限界と底面せん断力の計算結果との比較である. 図において, 上図は今回のシミュレーションで, 摩擦係数を変化させたときの砂の移動限界を示したもので, 図中の値は静止摩擦係数である. 下図は, 無次元せん断力の値のコンターである. 実験結果から判断すると, 静止摩擦係数として 0.6 が適当であると判断できた. このときの, 限界シールズ数は周期1秒について 0.085, 2秒について 0.18 となる. なお, 動摩擦係数は実験上の観察より 0.1 とした.

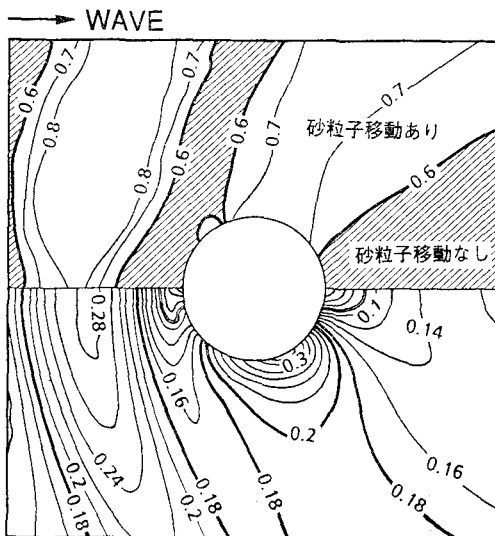
3.2 シミュレーション結果

図-3 は, 周期1秒, 波高 0.1 m の波に対する, 初期位置が $X_p = -0.585 \text{ m}$, $Y_p = 0.676 \text{ m}$ の砂粒子の8周期にわたる移動状況を示したものである. 円柱の中心は座標の原点で, 波は X の正方向に進んでいる. 砂粒子は底面で楕円軌道を描きながら, その平均的な位置は, 円柱方向に移動している. この平均的な砂粒子位置の移動方向は, 実験による観察と一致している. この地点では, 水平2方向の流速が共に0となることがないため, 一旦動き出した砂粒子は止まることは無い. これは, 平面波動場での砂粒子の移動の特徴である.

図-4~5 は周期1秒および2秒に対する砂の移動状



(a) 周期1秒



(b) 周期2秒

図-2 静止摩擦係数による砂の移動限界と無次元せん断力の比較

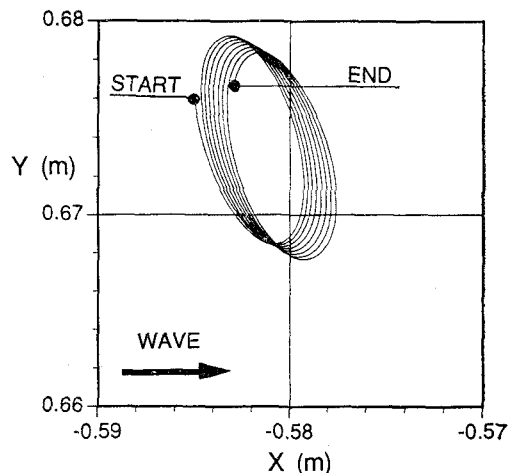
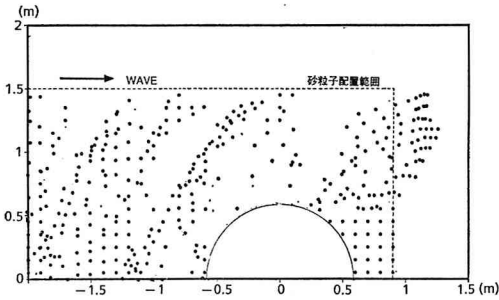
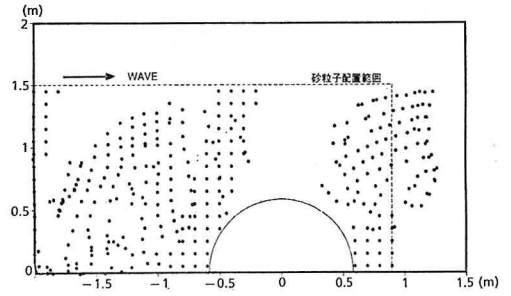


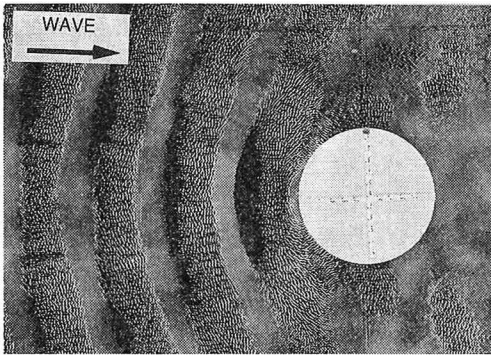
図-3 砂粒子の移動の軌跡 (周期1秒)



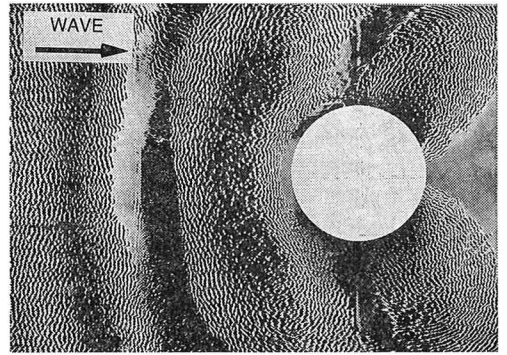
図—4 砂粒子の移動シミュレーション (周期1秒 $t=550$ 秒)



図—5 砂粒子の移動シミュレーション (周期1秒 $t=500$ 秒)



写真—1 実験における砂粒子の移動 (周期1秒 $t=600$ 秒)



写真—2 実験における砂粒子の移動 (周期2秒 $t=2220$ 分)

況のシミュレーション結果である。波の作用時間は、それぞれ実時間で550秒と500秒である。また写真—1および2は、実験結果を示している。写真—1はほぼ同じ時間なので、写真—2は実験の方が長い。両者を比べると、シミュレーションは実験結果を概略説明できていると言える。例えば、周期1秒の円柱の前面についてみると、写真において、黒い領域(砂粒子が消失した領域)と白い領域(砂粒子が動いていない、あるいは、堆積した領域)および砂漣が形成されている領域がある。砂が消失した領域では、シミュレーションにおいても消失しており、また、白い領域では、シミュレーションにおいて、動かない粒子と他から進入してきた砂粒子が混在している。周期2秒についても、側方の砂の消失と円柱前面の節の部分に砂粒子が集まることも、シミュレーションは説明できている。ただし、砂漣が発生している領域では、シミュレーションでは、砂が動いていない。実験では黒い部分の砂が、最初に移動し、その地点に砂漣が形成される。この砂漣は、次第に、本来砂が動かない領域に進行していく。このため、実験の最初には動かなかった砂も、時間の経過と共に砂漣の影響で動き出す。これが、砂漣部分で実験とシミュレーションの異なる理由の一つである。その他、移動中の砂粒子は、シミュレーションのように常に底面を掃流状態で動くのではなく、その移動高さは変動していることが考えられ、このこともシ

ミュレーションと実験の差となっていると考えられる。

以上により、滑面上の砂の動きは、砂漣が形成された部分を除いて、ほぼ式(1)および(2)で説明できる。

これまでに述べてきた滑面上の砂の移動状況は地形変化実験の初期に発生するものと考えられる。しかし、実際は地形変化の過程で砂漣が発達してくるので、砂粒子の運動あるいは外力自体が変化するため移動床実験における洗掘パターンと滑面上の砂粒子の残留パターンは若干異なった様相となる(等者ら:1985)。

4. 砂漣面上の平均流

図—6と7は、周期1秒と2秒の波に対する平均流のベクトル図である。図を見ると、上層(10あるいは15cmの点)と下層で平均流の向きが異なっていることが分かる。まず下層の流れに着目すると、周期1秒の場合、底面近傍で円柱の岸側(後方)から側方へ回り込むような流れが存在する。この傾向は、周期2秒の場合さらに顕著となり、水深の半分的位置でもその流れが存在している。一方、写真—3は、周期2秒におけるエスレンビーズの粒子の動きをあらわしている。エスレンビーズは、底面から砂漣上4~5cmの高さで移動しているが、エスレンビーズも円柱の側方に集まっている。滑面上での円柱周辺のエスレンビーズ粒子は、波が作用する

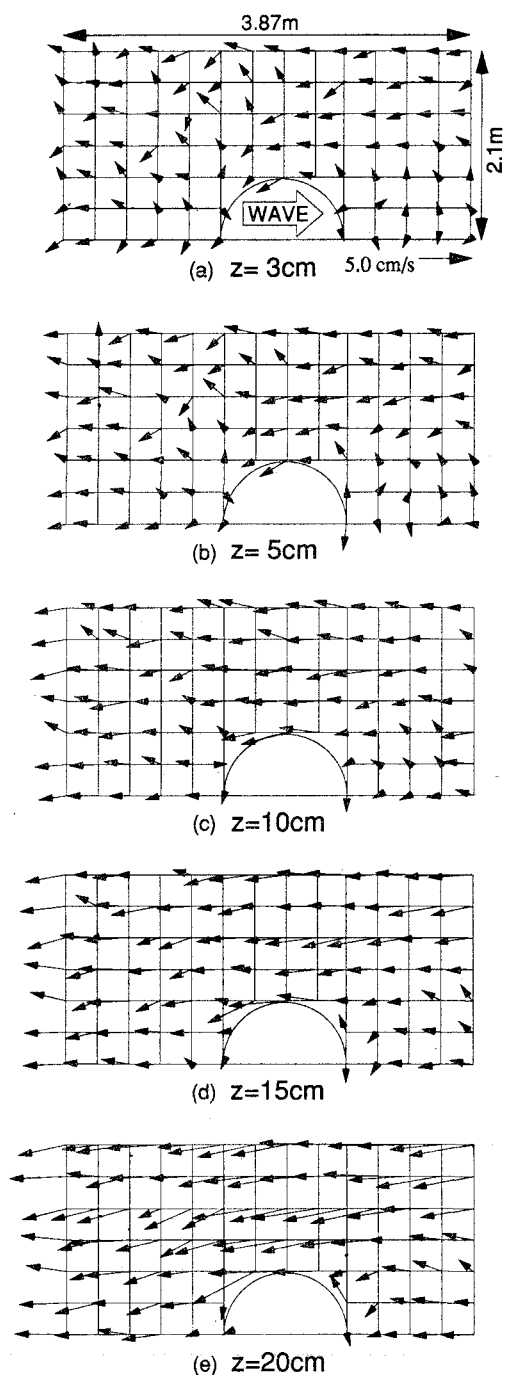


図-6 円柱周辺の平均流の測定結果 (周期1秒)

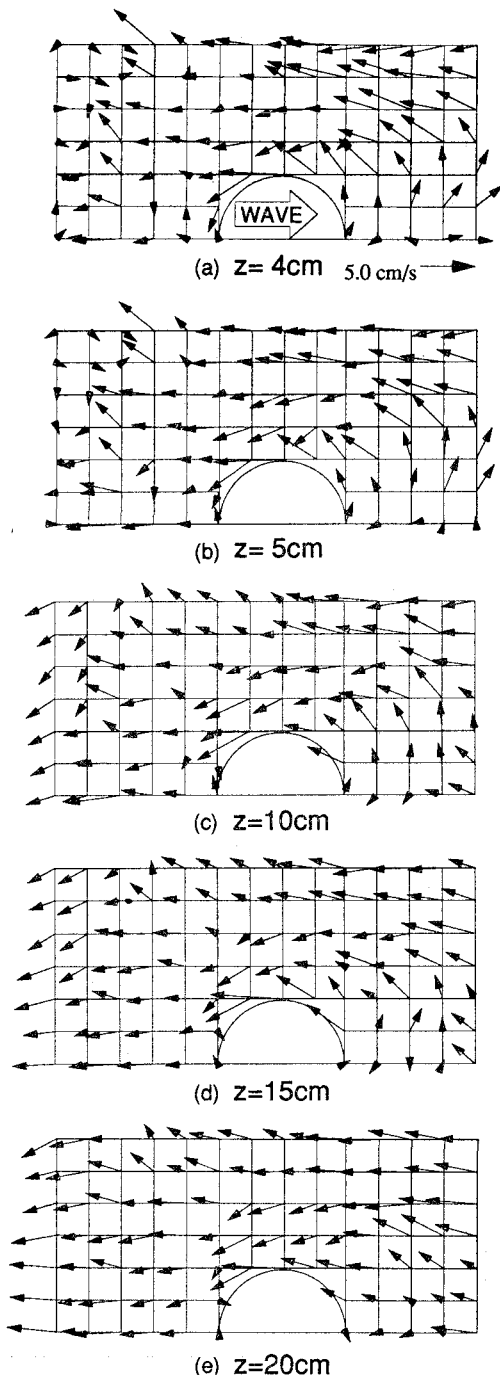


図-7 円柱周辺の平均流の測定結果 (周期2秒)

と、一斉に下流側に流されたのに対し、側方で集まったこの粒子は、実験中(約30分程)同じ場所に留まっていた。

次に、図-6あるいは7において、上層の流れ(水深20cm)に着目すると、全体的に流れは冲向きである。さらに、固定砂漣床外の、水深の半分の高さにおける平

均流を測定した結果、円柱のあるなしに関わらず、水槽内には一定の冲向きの流れが発生していた。この流れを、閉鎖領域での戻り流れとして、灘岡ら(1982)になら見積ると、4cm/s程度となり、実験の値と概略一致する。水槽などのように閉鎖された場所で、波の実験を行なう場合、このような戻り流れは必ず存在する。

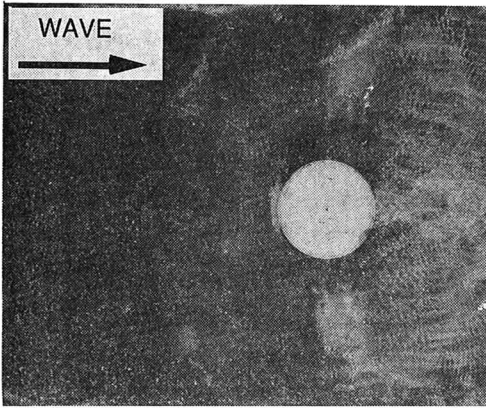


写真-3 砂漣上のエスレンビーズの動き (周期2秒)

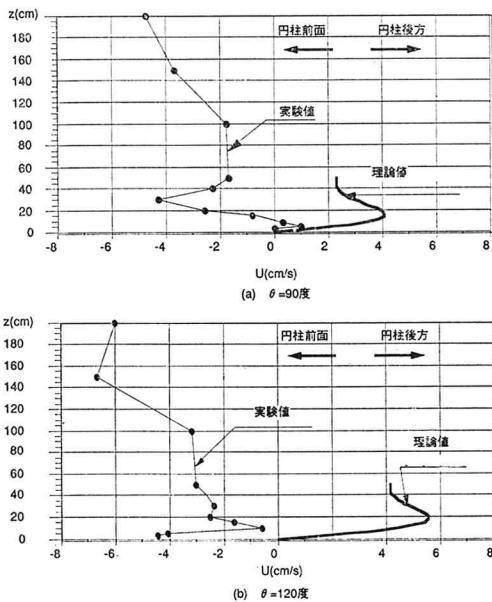


図-8 レーザー流速計による円柱近傍の平均流 (周期2秒)

本実験で得られる流速場では、このように、水槽が閉鎖しているために発生する冲向きの流れの影響を考慮しなければならぬ。

さらに、底面近傍を詳しく見たのが 図-8 (a) およ

び (b) で、レーザー流速計で測定した円柱側方(90度)と斜め前方(120度)における平均流速の鉛直分布を示している。図には参考のために層流境界層理論で求められるオイラー的平均流速も合わせて示している。このとき、境界層の厚さは砂漣高とした。図をみると層流境界層理論による値と実験値は、絶対値だけでなく方向までも異なっている。しかし、定性的に見ると、境界層内の実験の流速値は、境界層外の冲向きの流れに引っ張られているように見える。このような流れは、上層の流れと砂漣上の境界層内の流れの相互干渉が、その発生の一つの原因と考えられ、今後、戻り流れのある砂漣上での平均流の構造として検討する必要がある。

5. 結 論

砂粒子の運動方程式を用いて、滑面上の砂粒子の運動の、数値シミュレーションを実施し、固定床での砂移動を説明することができた。次に、砂漣上の平均流を測定し、円柱構造物周辺の流れ場の特性を明らかにし、実験における構造物周辺の流れは、戻り流れの影響を考慮して検討する必要があることを示した。

参 考 文 献

- 入江 功・灘岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次 (1984): 重複波による防波堤前面での2次元的海底洗掘—砂の移動機構に着目した研究—, 港研報告, 第23巻, 第1号, pp. 3-52.
- 勝井秀博・東江隆夫 (1990): 大口径円柱周辺の底質の移動限界と洗掘, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 379-383.
- 斎藤栄一・佐藤慎司・柴山知也 (1988): 波動場における大口径円柱周辺の局所洗掘に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 392-396.
- 東江隆夫・勝井秀博 (1985): 大口径円柱周辺の洗掘現象, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 452-429.
- 東江隆夫・勝井秀博・灘岡和夫 (1991): 大型海洋構造物周辺の砂の移動機構, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 451-455.
- 灘岡和夫・近藤隆道・田中則男 (1982): レーザードップラー流速計による碎波帯内の流速場の構造の解明, 港研報告, 第21巻第2号, pp. 49-106.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・梶山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演論文集, pp. 406-410.
- Carter, T. G., P. L. E. Liu and C. C. Mei (1973): Mass transport by waves and offshore sand bedforms, J. Waterway, Harbours Coastal Eng. Div. ASCE, Vol. 99, pp. 165-184.