

港湾工事に伴う濁りの流動特性に関する実験

AN EXPERIMENTAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF SEDIMENT TRANSPORT DUE TO HARBOR CONSTRUCTION

松田信彦¹・松原雄平²・檜谷 治³・黒岩 正光⁴・山本 貴司⁵
Nobuhiko MATSUDA, Yuhei MATSUBARA, Osamu HINOKIDANI,
Masamitu KUROIWA, Takasi YAMAMOTO

¹正会員 工修 東亜建設工業(株) (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

²正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

³正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

⁴正会員 工博 鳥取大学助手 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

⁵学生員 鳥取大大学院 工学部土木工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

When we will evaluate an influence on the turbidity due to the harbor construction, it is very important to investigate the behavior of the fine sediment. Earth filling soil contains the fine sand which settling velocity is very low and floats for a long time. Therefore especially the dumped soil by hopper barge can be thought to cause large-scale water pollution around the surface of the water.

In the previous study, the property of settling soil and the flowing characteristics of the muddy water lump after the bottom collision usually have been considered. But, the occurrence mechanism of turbidity to diffuse around the surface of the water just after the injection is hardly being studied. When harbor construction is performed, the turbidity, which usually causes a problem, might be occurred by not only the turbidity from the bottom layer, but also turbidity around the water surface floating for a long time.

Therefore in this research, the turbidity to diffuse around the surface of the water just after the injection is investigated experimentally. Form the experimental results, it is found that the falling fine sediments might be lifted to the water surface due to the bubble way of the air contained in the injection soil.

Key Words: Turbidity, hopper barge, muddy water lump

1. はじめに

港湾工事に伴う濁りの流動特性を把握することは、工事周辺海域の環境への影響を評価する上で非常に重要である。特に底開バージによる土砂投入は、水面付近から多量の土砂を投入するため、投入土砂に含まれる沈降速度の遅い微細土粒子が長時間投入周辺の水域に浮遊し、大規模な水質汚濁を引き起こしていると考えられる。

従来の研究においては、このような濁りの拡散に対して、拡散方程式を用いた解析や密度流的な(乱流サーマル理論)挙動としてとらえたもの^{2,3)}、個々の固体粒子(代表粒子)の運動を個別要素法とMAC法を組み合わせる誘起流動場の再現を試みたもの⁴⁾がある。しかし、従来の研究の多くは、土砂直投による濁水塊の沈降特性と底面衝突後の底面に沿う底層付近の流動特性に着目した研究が多く、土砂投入直後に水面付近で拡散する濁りの発生メカニズムに

ついてはほとんど研究されていない。港湾工事の施工時において通常問題になる濁りは、底層付近の濁りよりもむしろ水辺付近で長時間浮遊している濁りであることが多い。

本研究では、このような土砂投入直後に水面付近で拡散する濁りを、中立粒子とガラスビーズを用いて実験を行い、水面付近の濁りの拡散メカニズムを明らかにするものである。

2. 従来の現地観測結果

古土井¹⁾は昭和59年に関西国際空港建設予定地において地盤改良施工実験を実施した。この際、工事に伴う濁りの発生拡散等を調査している。図-1は土運船による二次敷砂投入実験における調査点位置である。図-2は、図-1の3ライン(土砂直投位置から200m離れた点)における、山砂投入30分後のSSの横断面分布である。図-3は、図-2と同じ条件で山

砂投入30分後のSSの縦断面分布である。

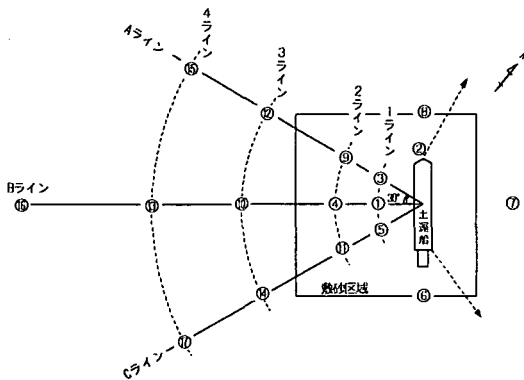


図-1 調査点位置

直投直後に土砂投入により生じた流れ（乱泥流）により底層で急激に拡散する高濃度の濁りは、30分後には海底面上3m程度の厚さで300m付近まで達している。一方、上層の水面下5m付近の濁りは、土砂投入直後は土運船の周囲に気泡とともに浮かび上がったものが見られる程度で、投入後10分後くらいでようやく上層へ浮かび上がり、低濃度の微細粒子群が短時間で遠方に拡散する。この上層の濁りは、横断面、縦断面分布を見て分かるように乱泥流が上層に現れたものではなく、土砂が海底に達したはね返りのものと、乱泥流が進んでいくときの分散運動における濁りの分離、あるいは気泡とともに上昇したものが主なものと指摘していることから、実験では気泡と共に上昇する濁りについて実験を行った。

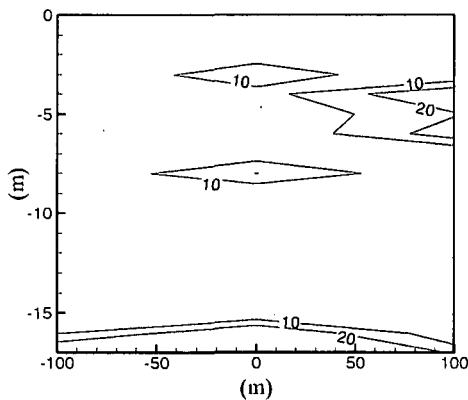


図-2 SSの横断面分布

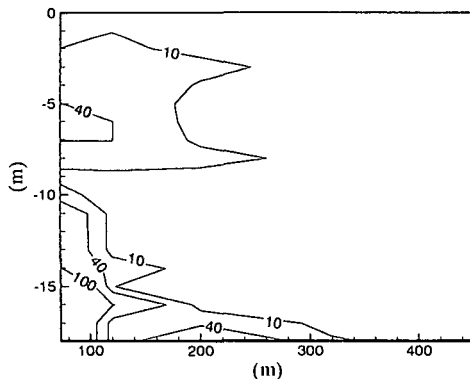


図-3 SSの縦断面分布

3. 実験方法及び実験結果

従来のシルトなど微細な粒子を使った室内実験では、現地観測のような上層付近の濁りについては再現されていない。これは、使用している微細な粒子の空隙が少ないために、気泡があまり混入されず、粒子投入後の気泡による上昇流がうまく再現できていないためだと考えられる。

そこで、本研究では粒子の空隙中の気泡を、別の方法で再現することを考え、投入土砂の沈降速度に着目して投入土砂をモデル化することにした。投入土砂に含まれる濁りの拡散粒子に比重が1.01の中立粒子、先行して沈降する数十cm程度の石にはガラスビーズを使用し実験を行った。濁りの拡散粒子に中立粒子を使用すると、わずかな気泡でも中立粒子と付着すると、比重が小さくなり上昇するため、実際と類似した濁りの拡散が再現できる。

実験に使用した粒子は表-1に示す粒子を使用した。実験粒子の特性値を示しており、 d_{50} ：中央粒径、 ρd ：粒子密度、 U_d ：自由沈降速度（最終沈降速度）であり、また、 $Red (=U_d * d_{50} / \nu)$ は粒子レイノルズ数、 ν ：水の動粘性係数である。

表-1 使用粒子

	種類	d_{50} (mm)	ρd (g/cm^3)	U_d (cm/s)	Red
①	ガラスビーズ	5.0	2.50	48.4	2,418
②	中立粒子	5.0	1.01	2.6	132

(1) 実験1

はじめに、濁りの拡散は移流の影響を大きく受けるため、土砂投入時の流れ場について詳しく計測することにした。

(a) 実験方法

実験は長さ22m、深さ0.9m、幅0.6mの前面ガラス張り大型水槽の上部中央付近に図-4に示す投入装置（長さ0.55m、深さ0.3m、幅0.7m、投入幅0.01m）を水面から5cmのところ設置し、5mmのガラスビーズ3kgを約8秒間連続投入した。投入装置周辺の流速は、3次元超音波ドップラー流速計を用いて測定した。測定間隔は0.4秒で、測定時間は約30秒である。測定場所は、図-4のように水平方向に投入装置の直下から5cm間隔で10cmまで3測点と、鉛直方向に水深5cmから5cm間隔で水深45cmまで9測点、合計27測点であり、各々の測点で3回計測し、計測結果はその平均とした。

(b) 実験結果

図-5～10は、投入装置直下の上層（測点1）、中層（測点4）、下層（測点9）の3測点における鉛直流速と水平流速の時間変化を示したものであり、投入場所付近では、気泡やガラスビーズによる変動が大きいため、1秒間の移動平均流速にしている。一方、図-11、図-12は、測定結果を流速ベクトル図にしたもので、測定値の変動を抑えるために、4秒間

の平均流速を使用している。

まず、投入中の流れについてみると、投入場所では投入粒子によって投入直後から速い下向きの流れが誘起されていることがわかる。しかしながら、この下向きの流れは、投入投入中に徐々に弱まる傾向にある。一方、投入位置の外側では、下降流を補う投入位置に向かう水平方向の流れが発生している。また、底面付近では、底面に衝突した下降流が左右に向きを変えて流れている様子がわかる。

つぎに、投入後の流れに注目する。投入粒子による下向きの誘起流は、投入完了後8-12秒で上部から急激に減少している。この後、上層ではガラスビーズと一緒に連行された気泡の上昇により発生した流れにより、上向きの流れが発生している。この上昇流によって微細土砂粒子が上昇すれば、水面付近で高濃度域が発生する。特に現地での土運船による土砂投入では、水深が大きく、気泡が上昇する時間が10分以上であることが多い。その場合、土砂の投入が完了し、実験で見られたように上層から下降流が急激に減少すると、沈降途中の微細な土粒子が停滞することとなる。そこに気泡と共に大きな上昇流が発生すれば大量の濁りが、短時間で水面まで運ばれる可能性がある。

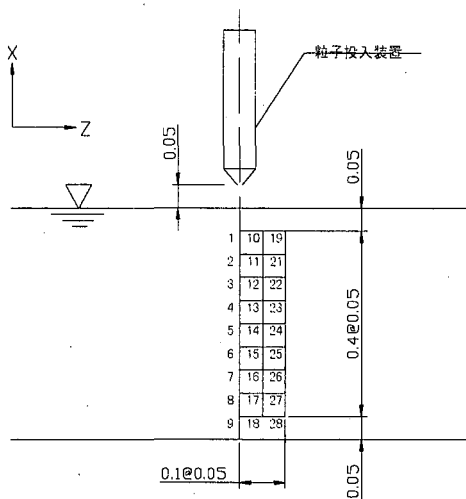


図-4 測定位置図

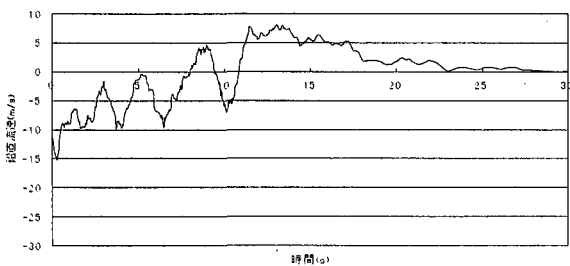


図-5 測点1 鉛直流速変化

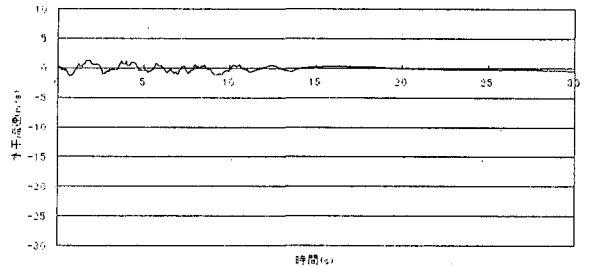


図-6 測点1 水平流速変化

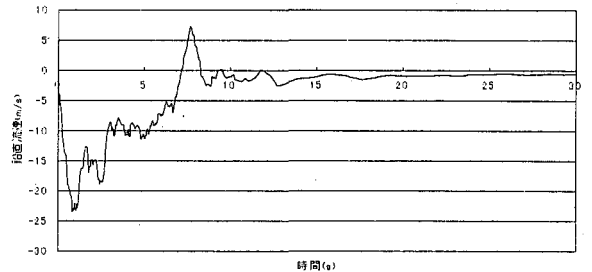


図-7 測点4 鉛直流速変化

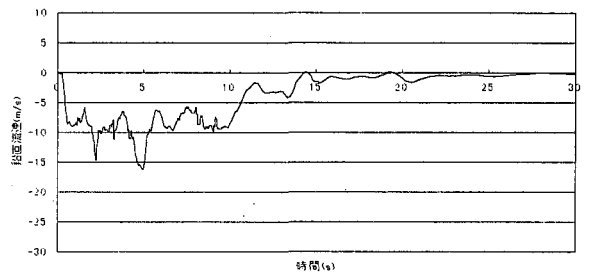


図-8 測点4 水平流速変化

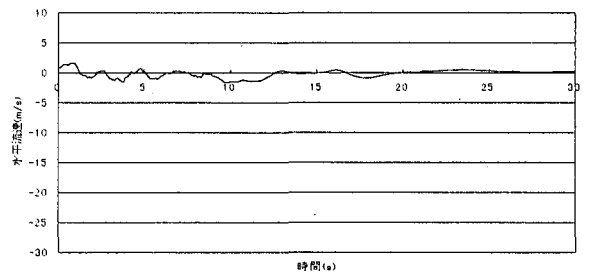


図-9 測点9 鉛直流速変化

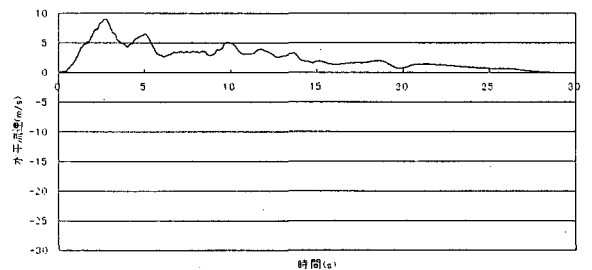


図-10 測点9 水平流速変化

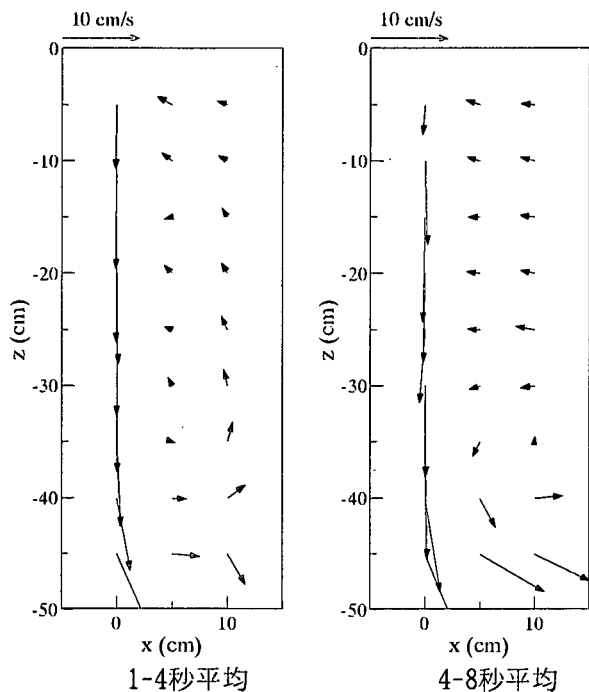


図-11 投入後の流速ベクトル図

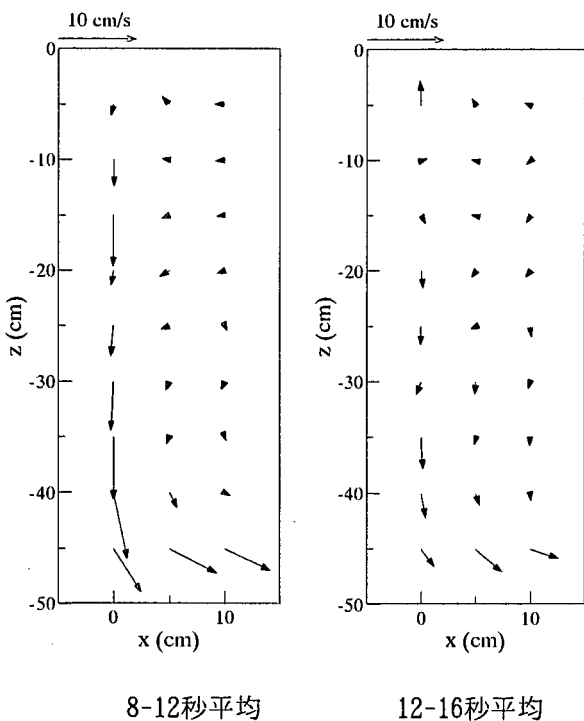


図-12 投入後の流速ベクトル図

(2) 実験2

実験1で上昇流が確認できたので、つぎに中立粒子を用いて投入時直後の濁りの拡散について実験を行った。

(a) 実験方法

実験装置は図-13に示すように、高さ58cm、幅33cm、奥行き33cmの亚克力水槽の中央部に粒子投入装置(幅3cm、高さ20cm、奥行き5cm)を取り

付けたものである。5mmガラスビーズと中立粒子を合計40cm³になるように1:1で混合した。粒子の投入時間は平均0.8秒で水面から5cmの高さから投入装置の幅を2cmにして投入した。

粒子運動の測定にはビデオカメラを用いて、図-14のようなLWHについて中立粒子を計測した。今回の実験では、初期の水面付近での拡散現象を調べる事を目的としているので、ガラスビーズが水槽の底についた時点で計測を終了する。また、現象のばらつきを押さえるため、同じ実験を3回行った。

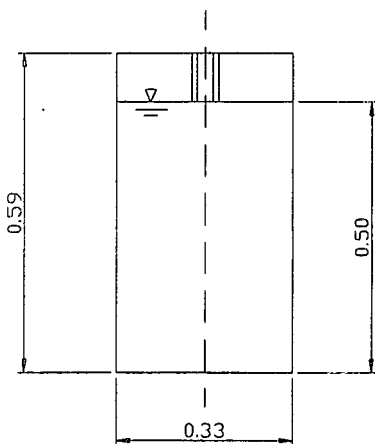


図-13 実験水槽

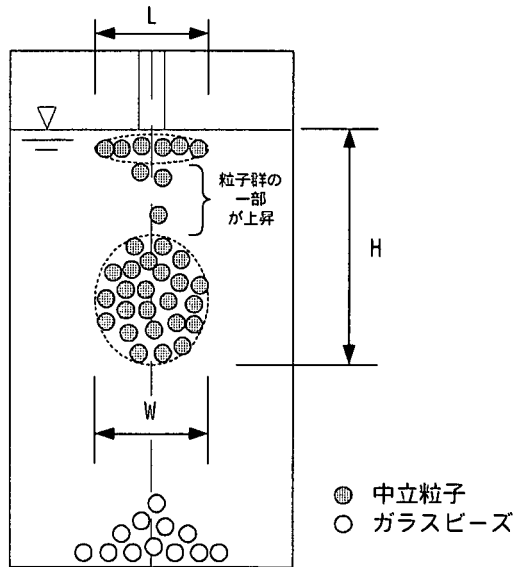


図-14 中立粒子の測定方法

(b) 実験結果

写真-1は粒子投入2秒後の様子である。中立粒子の一部はガラスビーズの誘起流に乗って1度沈降してから、水面に浮上してくる状態を撮影したものである。中立粒子が上昇するには、投入時に連行された気泡の上昇流によるものと、小さい気泡が中立粒子に付着して上昇する2通りが考えられる。中立粒子に気泡が付着すると、比重が軽くなり上昇している粒子もある。実際に土粒子に気泡が付着して浮上することは考えられないが、中立粒子が、微細な土

粒子と気泡が一緒になっていると考えると、現実に近い挙動をしているとして考えられる。

まず、全体的な中立粒子の沈降特性を見たものが図-15であり、沈降する中立粒子群の先端位置の時間的変化をあらわしたものである。中立粒子とガラスビーズを混ぜて投入すると、ほぼ一塊となって沈降し、単体で沈降するときよりかなり早い速度で沈降することがわかる。

一方、図-16は水面付近に浮上した中立粒子の拡散を調べたものである。水面付近の拡散速度は3cm/s以上で、水平流が発生していると考えられる。

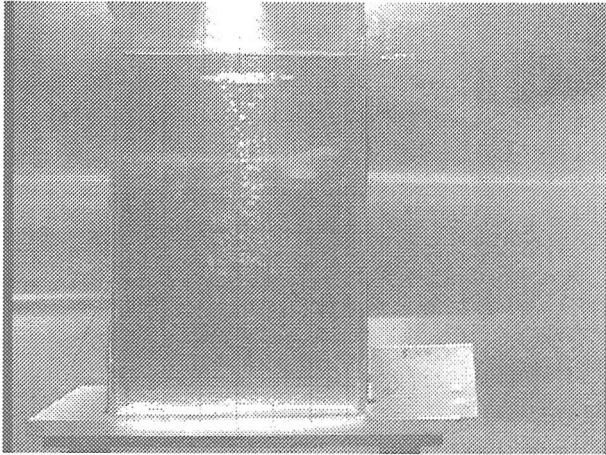


写真-1 粒子投入2秒後の様子

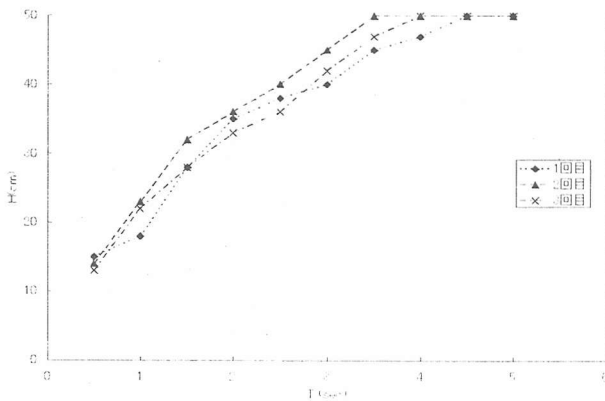


図-15 中立粒子の沈降距離と時間の関係

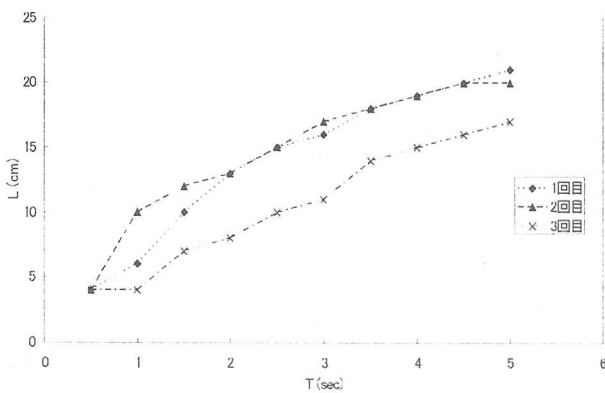


図-16 中立水面付近の広がり時間との関係

4. 中立粒子の妥当性について

中立粒子の妥当性を検討するために、微細粒子(8号珪砂)と投入状況の比較した。実験は実験1と同様の条件で、5mmのガラスビーズ3kgに、1,000ccの珪砂と中立粒子をそれぞれ混合して投入したものである。

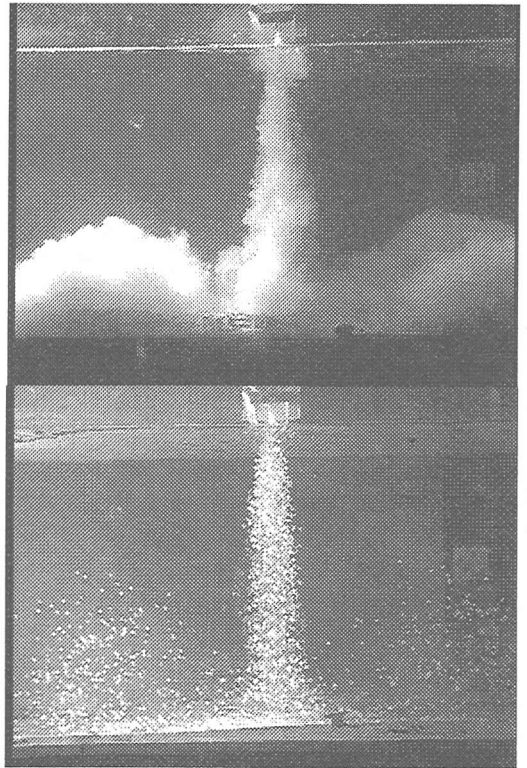


写真-2 投入開始6秒後 上：珪砂，下：中立粒子



写真-3 投入開始26秒後 上：珪砂，下：中立粒子

写真-2および写真-3はそれぞれの実験の投入後6秒後と26秒後の状況を比較したものである。まず、投入中の6秒後の状態を比較すると両者は非常に類似した拡散をしている。したがって、中立粒子を微細粒子とした実験もある程度実際の現象を表現できているものと考えられる。

つぎに、写真-3は拡散状況を比較したものであるが、沈降速度の違いによって大きく状況が異なっており、沈降速度の速い珪砂は停滞しているのに対し、気泡が付着し沈降速度が遅くなっている中立粒子は上昇している。したがって、投入後に微細粒子が水面付近に浮上するかどうかは微細粒子の沈降速度と土砂投入に伴って発生する気泡による上昇流の比によって決まる現象であると考えられる。

5. 水面付近の濁りの発生メカニズム

本研究で得られた実験結果から推定した水面付近の濁りの発生メカニズムをまとめると以下のようである。

(1) 上層の濁りの発生源

上層の濁りとしては、沈降中の微細粒子が上層で分離し停滞したもの、乱泥流により底泥が巻上げられたもの、海底に達した土砂がはね返り上昇したもの、乱泥流が進んでいくときの分散運動における濁水塊からの分離し上昇したものが考えられる。

(2) 濁りの動き

停滞している微細土粒子の上昇については、投入完了後の微細土粒子の沈降時間と上昇流が発生している時間が重要であると考えられる。

今回の実験では水深が浅く、実際の粒子より中立粒子の沈降速度が速いため、気泡による上昇流が発生するまでに、ほとんどの中立粒子が沈降している。

しかしながら、実際の土運船による投入では水深が大きいので、実験1のように投入後に短時間で土砂による下向きの誘起流が小さくなれば、沈降中の微細土粒子が沈降途中で停滞する。一方、気泡は投入中に連行されるものと、土砂の間隙に含まれる空気が土砂の着底後に時間をかけて上昇するものが考えられるが、おそらく後者の土砂に含まれる空気が、土砂による誘起流が小さくなってから、長時間気泡を発生させ、これにより停滞していた微細土粒子が流れに乗って水面付近に持ち上げられると考えられる。

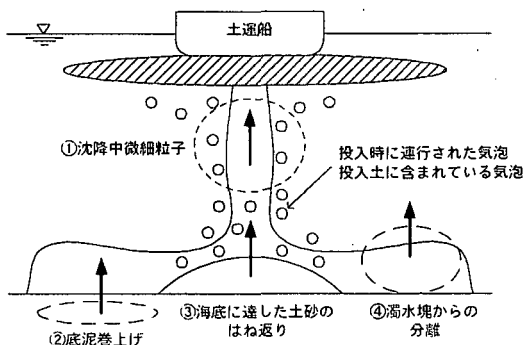


図-17 上層の濁りの発生源

メカニズムを概念図で示したものが図-17である。

6. まとめ

本研究は、土運船で土砂投入をする際、水面付近で長時間浮遊する粒子の運動に着目し実験を試みた。実験結果より、上層の濁りは、土運船による投入完了後、土砂による誘起流が急激に小さくなり、沈降中に停滞した微粒子が、投入土砂の間隙に含まれる空気の気泡流により水面付近に持ち上げられるのが主な要因と考えられる。今後、土砂投入時の底開バージ周辺の流れについて、現地観測を行い上昇流について詳しく調査する予定である。

参考文献

- 1)古土井 光昭：港湾工事における濁りの挙動に関する研究，大阪大学学位論文，1989。
- 2)玉井 昌宏，分散相誘起型混相流の流動・乱流構造に関する研究，大阪大学学位論文，1994。
- 3)玉井 昌宏，村岡 浩爾，固体粒子群の落下挙動と誘起流動に関する解析，海岸工学論文集，No. 39， pp. 961-965，1992。
- 4)小田一紀，重松 孝昌，大西 伸幸，井上 雅夫，改良型DEMAC法による粒子群の沈降・分散挙動の解析，海岸工学論文集，No. 39， pp. 971-975，1992。