

土砂投入直後に発生する気泡流に関する実験

松田 信彦* ・ 松原 雄平** ・ 檜 谷 治***
黒岩 正光**** ・ 五明美智男*****

海上空港などの大規模な埋立工事では、大型の土運船を使用して短時間に大量の土砂を直接投入する工法が多く用いられている。土運船の環境影響については、土砂や濁水塊の落下挙動に関する研究が多く行われているが、従来の研究では投入土砂から発生する気泡流の影響を考慮しておらず、気泡流によって生じる水面付近の濁りを十分に再現できていない。本研究では気泡流に伴う濁りの発生現象を明らかにするために、大型水槽を用いて土砂投入実験を行い、投入土砂の間隙量（気相）と気泡の発生量の関係について調べた。その結果、投入土砂の落下時間が短いほど、気泡の発生率が高くなる傾向があることが分かった。

1. はじめに

海上空港や沖合人工島の埋立工事で使用される土運船は、一度に数千 m^3 という大量の土砂を運搬し、短時間で投入することが可能で多くの工事で使用されている。しかし、一度に大量の土砂を投入するため、汚濁による周辺海域の環境への影響について、十分な配慮が必要である。土砂投入に関する従来の研究では、サーマル理論に基づく研究や、多くの数値モデルが提案されており、投入土砂の落下挙動、海底面へ衝突、その後底面に沿って流動する現象は、ある程度明らかになってきている。しかし、実際の土運船によって生じる現象はこれだけではなく、土砂投入直後に発生する気泡流の影響を無視することはできない。写真—1のように、山砂などの空気を多く含んだ土砂を、土運船を使用して一気に投入すると、水中で土砂に含まれている大量の気泡が気泡流となっており、海底から濃度の高い濁りを押し上げる現象が生じる。

このような気泡は土質や土量によって異なるが、20分以上も気泡が発生していることがある。表層の濁りは、風や波によって短時間で広範囲に拡散し、水面付近で長

時間浮遊することから、大規模な水質汚濁を引き起こすことから、工事監視では重要である。

本研究ではこのような気泡流に伴う濁りの発生現象を明らかにするために、大型水槽を用いて土砂投入実験を行い、投入土砂の間隙量（気相のみ）と気泡の発生量の関係について調べた。

2. 実験概要

(1) 実験装置

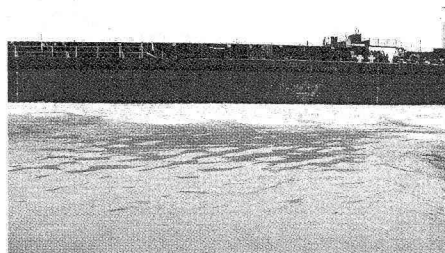
図—1のように、実験に使用した水槽は、長さ3.5×幅3.5×高さ2.5 mの大きさで、水槽の側面はガラス張りになっており、土砂投入状況をビデオ撮影した。投入水深は、土砂中に含まれる気泡を全て解放するため、土砂堆積厚が薄くなるように水深を2 mとした。

土砂投入装置は、長さ45×幅47×深さ21 cmのアクリル製で、投入装置の開閉はモータ制御で開扉速度を変えることが可能で、投入装置の最大開扉幅は18.5 cmである。本研究では上昇してくる気泡を、土砂投入の障害にならない場所で、出来るだけ多く回収する必要があるため、土砂を短時間で一気に投入した。土砂を短時間で投入することで、回収出来ることができない中心付近の気泡量を最小限にした。

また、土砂投入時に発生する誘起流を、投入中心から0.5 mと1.0 mの位置で、電磁流速計を用いて計測した。投入土砂の着底時刻を計測するために、投入装置の直下に土圧計1台を設置し土砂の衝撃圧によって観測した。土砂の堆積形状については、水槽の底面に10 cm間隔で格子状に線を引いた薄いゴムシートを敷き、10×10 cmの格子内に堆積した土砂の重さを測定した。

(2) 気泡回収方法

気泡回収装置は、図—2のように直径が9 cmのロートを逆さまに10 cm間隔で10個取り付けたもので、投入に影響しないように、投入中心から20 cm離して設置した。回収ビンに入った気泡は、メスシリンダーを使って気泡量を測定した。



写真—1 土砂投入直後の気泡

* 正会員 工 修 東亜建設工業(株) 技術研究所

** 正会員 工 博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工 博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

**** 正会員 工 博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

***** 正会員 博(工) 東亜建設工業(株) 技術研究所

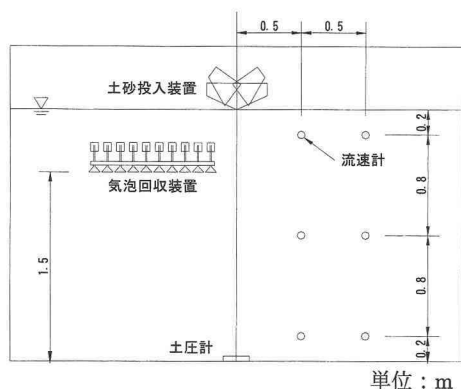


図-1 実験水槽

(3) 実験条件

今回の実験では、投入土砂の空隙に含まれる空気量を基準にし、水中で土砂から開放される気泡の量について調べることを目的としている。また、気泡の発生量に影響する要素を調べるため、投入土砂の含水比と粒径を変えて、その影響について調べることにした。

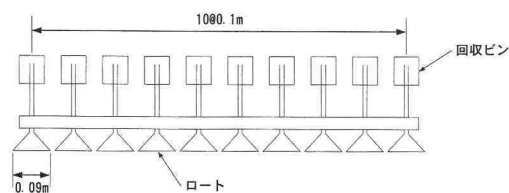


図-2 気泡回収装置

実験では表-1に示すように、コンクリート用の砂と7号硅砂を用いて、計6回の投入実験を行った。図-3は、使用した砂の粒度分布である。一回の投入で使用する土量は、発生する気泡量を考慮して全ケース20kgとした。また、投入装置の開扉速度は、全ケース6.6秒で開くように設定した。

表-1 実験状況

ケース	投入材料	含水比	D_{50} mm	単位体積重量 gf/cm^3	空隙率
S1	砂	4.5%	0.447	1.542	33.1%
S2		1.5%			
DS1		0%		1.496	33.7%
DS2		0%			
K1	硅砂	0%	0.127	1.346	46.0%
K2		0%			

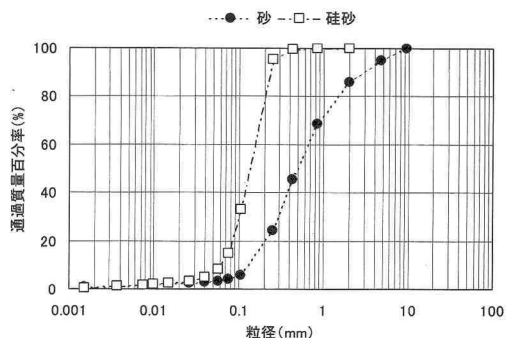


図-3 投入土砂の粒度分布

3. 実験結果

(1) 実験状況

投入開始の水面付近では、投入装置の開扉に伴って徐々に水面から土砂が供給され、土塊は体積を増加させながら、落下速度を上げて落下する。投入装置の直下では、投入装置から土砂が供給されている間、投入土砂の落下によって誘起された下降流のために、気泡の上昇はほとんど見られない。土塊の大半が底面まで落下し下降流が弱くなると、一斉に気泡の上昇が始まる。水槽の底面に衝突した土塊は、フロント部から気泡を出しながら底面に沿って移動する。土塊から気泡が発生するのは、土塊が底面に衝突してから土塊フロントの移動が停止するまでの5秒間ほどで、発生した気泡は左右に大きく揺らぐことなく、ほぼ真上に上昇する。写真-2は土塊が底面に衝突後に気泡を出しながら移動している様子である。

(2) 気泡発生モデル

気泡が発生する全体の気泡量を推定するためには、投入装置付近の気泡量を推定する必要があり、実験の状況から、図-4のようなモデルを考え、全体の気泡量を推定することにした。

投入土砂が海底に衝突する瞬間の初期堆積形状を斜線で塗った部分とし、土塊の体積 V_s を一定のまま、土塊の

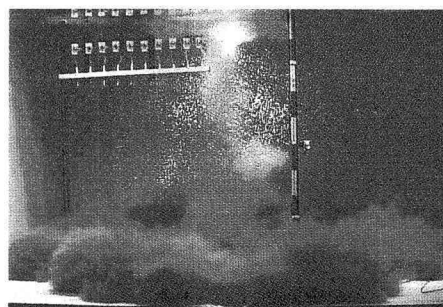


写真-2 上昇中の気泡 (ケース DS2)

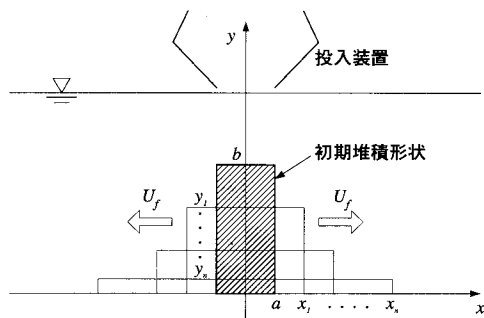


図-4 気泡発生モデル

フロント部分が両側に速度 U_f で移動する。土塊に含まれる気泡は、土砂の移動中に全て放出されると仮定する。土塊の体積 X_s は一定であるので、 y は x の関数で表現できる。

$$y(x) = \frac{a^2 \times b}{x^2} = \frac{a^2}{x^2} \frac{V_s}{\pi a^2} = \frac{V_s}{\pi x^2} \quad (1)$$

ここで、 a ：初期堆積形状（円柱）の半径、本研究では $a = 0.1 \text{ m}$ 、 b ：初期堆積形状（円柱）の高さ。

$y(x)$ は土塊のフロントが x にある時の単位面積当たりの土量である。次に、 x は時間 t の関数であるので、土塊のフロント速度 U_f を用いて表すと、

$$x(t) = U_f \times t + a \quad (2)$$

$$y(t) = \frac{V_s}{\pi (U_f \times t + a)^2} \quad (3)$$

単位体積の土塊から単位時間に発生する気泡量を q とすると、

$$q = \frac{\alpha \times n V_s}{V_s T} = \frac{\alpha + n}{T} \quad (4)$$

ここで、 α ：投入土砂の間隙が気泡になる割合、 n ：間隙率、 T ：気泡が土塊から出ている時間、 U_f ：土塊のフロント速度。今回は実験から T と U_f は、 $T = 5 \text{ s}$ と $U_f = 0.3 \text{ m/s}$ を用いた。

気泡の発生量は土塊の単位面積当たりに堆積している土量に比例すると仮定すると、 x_n 点（時刻 t_n ）において一回の土砂投入で発生する気泡の単位面積当たりの発生量 $Q(x_n)$ は、次式で書くことができる。

$$\begin{aligned} Q(x_n) &= q \int_{t_n}^T y(t_n) dt = \frac{q V_s}{\pi} \int_{t_n}^T \frac{1}{(U_f \times t + a)^2} dt \\ &= \frac{q V_s}{\pi (U_f \times T + a)(U_f \times t_n + a)} \quad (5) \end{aligned}$$

(3) 気泡量の水平分布

全体の気泡の発生率 α を求めるに、気泡回収装置で回収した範囲で、回収した気泡量と理論式で求めた気泡量が一致する α を求めて、全体の気泡量を推定した。気泡

発生率 α と投入土砂特性の関係については、後で検討することにする。

図-5と図-7は、実験で回収した気泡量の水平分布と、気泡発生モデルで求めた理論式を比較したものである。横軸は投入位置からの水平距離 x を、水深 h で無次元化したもので、縦軸は単位面積当たりの気泡発生量 Q を投入土量 V_s で除したものである。

全ての実験ケースで理論式と実験値が、概ね一致している。投入位置に近い所で回収された気泡量に比べて理論値が低くなっているのは、土塊のフロント速度 U_f に一定値を用いたことが、原因であると考えられる。

図-6と図-8は、実験終了後に堆積した土砂を、土砂投入中心から 10 cm 間隔で回収し乾燥重量を計測したものである。図-5と図-7の回収された気泡量と、気泡回収装置直下の最終的な土塊の堆積量の間にはほとんど相関がなく、このことから土塊から気泡が発生しているのは、土塊が底面に衝突してから土塊フロントの移動が停止するまでの数秒間であることが分かる。

(4) 土砂投入時の流速変化

図-9はケース DS2 における、土砂投入開始から 15 秒間の流速変化で、投入中心から 0.5 m 離れた位置で観測した結果である。図-9の上から、底面からの高さが 1.8 m、1.0 m、0.2 m の流向と流速である。流向は下向が 0° で外向きの流れが正である。図-9の一番下のグラフは、土圧計で計測した圧力変化である。

土塊の落下に伴い上層から流速が発生し、下層では土圧計の変化から、土塊の着底とほぼ同時刻に、土塊のフロントが通過し、大きな流速が生じている。土塊フロントの通過前と後で流向が逆転している。

(5) 土砂特性と気泡発生率の関係

図-10は投入土砂の落下時間と、気泡の発生率について全ケースまとめたものである。縦軸が理論式によって求めた気泡発生率 α で、横軸は投入を開始してから土塊の先端が着底するまでの落下時間である。

今回の実験結果では、落下時間が短いほど気泡の発生率が高くなり、逆に落下時間が長いと発生量が低くなる傾向が分かった。

含水比の影響については、含水比 3% 程度の砂（ケース S）と炉乾燥した砂（ケース DS）を用いて比較実験を行ったが、ケース S では砂が少し湿っているために摩擦が大きくなった。その結果、投入装置から滑り落ちる速度が遅くなり、ケース S の気泡発生率が低下している。

また、粒径の影響については、投入回数が少ないのであまり言えないが、今回使用した乾燥砂（ケース DS）と乾燥珪砂（ケース K）については、気泡発生率 α にはあまり影響していない。

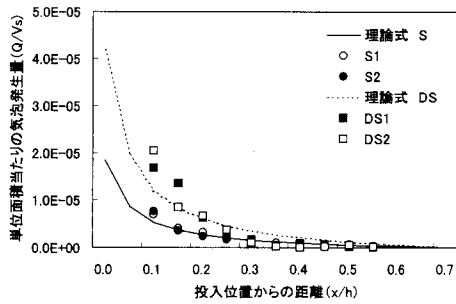


図-5 気泡の水平分布

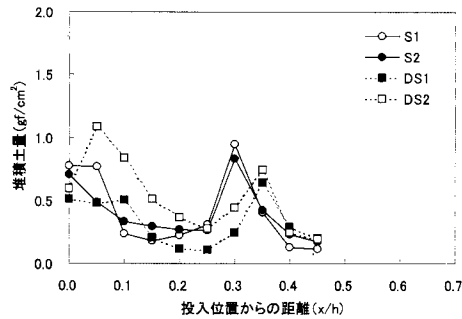


図-6 投入土砂の堆積量

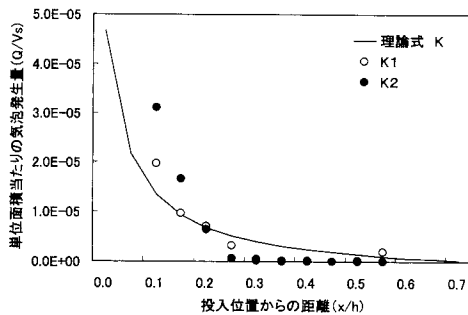


図-7 気泡の水平分布

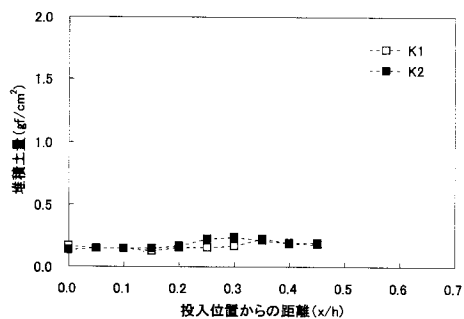


図-8 投入土砂の堆積量

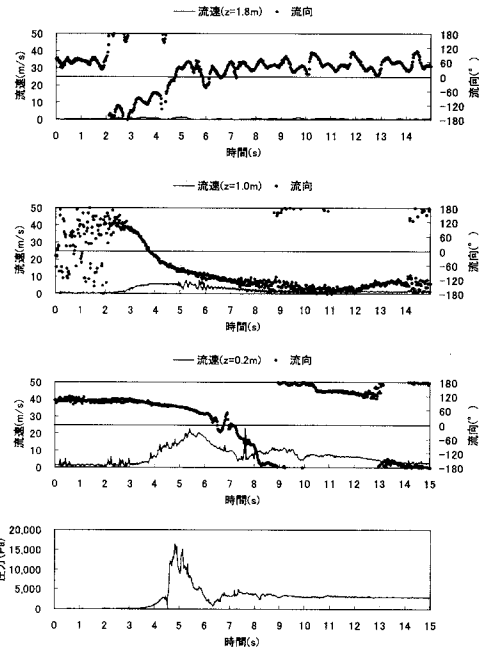
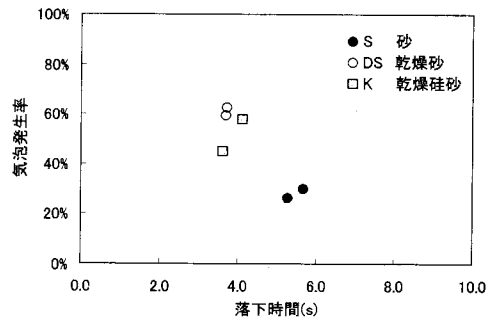
図-9 投入土砂時の流況変化と土圧計の圧力変化 ケース DS2
(投入中心から距離 0.5 m)

図-10 土砂の落下時間と気泡発生率

(6) モデルの適用範囲について

本研究で構築した気泡発生モデルは、実験結果からある程度の精度で気泡発生量を推定することが可能であることが分かった。

しかし、全ての土砂投入現象に適用できるモデルではなく、理論式の誘導時に設定した仮定を満足する必要がある。本モデルが適用できるのは、以下のような投入現象の時である。

- ・土砂投入時間が短い。
- ・水深が大きく、土塊が底面に衝突した後、底面に沿って移動し土砂が広範囲に堆積。
- ・土塊の移動が止まると気泡は発生しない。

4. おわりに

本研究では、土砂投入直後に発生する気泡に関する実験を行った。実験回数が少ないため、全ての土砂投入で適用することはできないが、今回の実験条件で分かったことを、以下にまとめる。

① 気泡回収装置で回収した発生量と、回収装置直下の最終的な土砂堆積量には相関が見られず、土塊から気泡が発生しているのは、土塊が底面に衝突してから土塊フロントの移動が停止するまでの数秒間であることが分かった。

② 気泡発生モデルで求めた理論式と、実験値がほぼ一致した。

③ 土砂の含まれる空隙全体の26~63%が気泡として発生した。

④ 土砂の落下時間が短いほど、気泡の発生率が高くなる傾向がある。

参 考 文 献

- 秋山壽一郎、浦 勝 (1998): 静水中に瞬間的に投下された重たい流体塊の流動特性に関する研究, 水工学論文集, 第42巻, pp. 529-534.
- 秋山壽一郎・斎賀 仁・ジャスワントシン・浦 勝 (2003): 直投土砂の濁りの拡がり水域水深の影響, 水工学論文集, 第47巻, pp. 1141-1146.
- 秋山壽一郎・重枝未玲・前多陽子 (2004): 3次元モデルによる水平面上の粒子サーマルの流動・堆積シミュレーション, 水工学論文集, 第48巻, pp. 1165-1170.
- 重松孝昌 (1998): 個別要素法を用いた個液混相流の解析モデルの開発とその適用性に関する研究, 大阪市立大学学位論文.
- 玉井昌宏 (1994): 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.
- 玉井昌宏・村岡浩爾・室田 明・町田博紀 (1995): 土砂直投工における濁りの初期拡散過程に関する研究, 土木学会論文集, No. 515/II-31, pp. 77-86.
- 永見光央・戸田圭一・大本雄二・渡邊 博 (1994): 水中混入気泡の流下に伴う挙動に関する数値シミュレーション, 土木学会第49回年次学術講演会, pp. 434-435.
- 古土井光昭 (1989): 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.
- 堀江 毅 (1983): MAC法による直投土砂の初期拡散に関する数値解析, 運輸省港湾技術研究所資料, No. 471, pp. 1-34.
- 松田信彦・松原雄平・檜谷 治・黒岩正光・山本貴司 (2002): 港湾工事に伴う濁りの流動特性に関する実験, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 563-568.
- 松田信彦・松原雄平・檜谷 治・山本貴司 (2003): 底開バージ土砂投入直後に発生する気泡流動場の観測, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 773-778.

秋山壽一郎、浦 勝 (1998): 静水中に瞬間的に投下された重たい流体塊の流動特性に関する研究, 水工学論文集, 第42巻,