

振動流下で形成される高濃度浮泥層の流動機構に関する実験的研究

九州大学工学部 学生員○熊谷博史
同 上 正 員 山西博幸
同 上 正 員 楠田哲也

1. はじめに

シミュレーションの定量的評価に際し、底泥面上に発生する高濃度層の挙動を把握し、その生成、安定、消滅および流動機構の解明を行うことは極めて重要な問題である。本研究は振動流中で形成される高濃度浮泥層の流動機構について実験的に検討したものである。

2. 実験装置および方法

本実験で用いた振動流水槽の概略を図-1に示す。従来の研究より高濃度層内下層部の粒子水平振幅は上層水の動きよりも先に進むことが確認されている（楠田ら、1993）が、これはピストンの直接的な影響により発生する現象とも考えられる。そこで今回は図-1に示したように、端部をベルマウス形状に加工した厚さ5cmのアクリル板を同振動流水槽の底部に設置し、水路中央部に2mのトレンチ部を作成した。このトレンチの有無による高濃度層内粒子の運動への影響を観察した。試料には佐賀県牛津川底泥（土粒子密度 $\rho_s=2600\text{kg/m}^3$ ）を用い、これを海水と十分に混合させて所定の濃度（ $\approx 10\text{kg/m}^3$ ）となるように調整した。実験は、この懸濁液を水槽内へ素早く投入した後すぐに行った。実験中は間隙水圧計や差圧計を用いて上層水や高濃度層内の圧力測定を行った。また水路中央付近に設置した壁面採水孔より懸濁液を採水し、メンブレンフィルターで濾過し随時濃度測定をした。さらに高濃度浮泥層内の微粒子運動を水路側面からのビデオカメラやモータードライブ付きカメラによって追跡した。

3. 実験結果および考察

図-2-aは写真撮影によって求めた粒子の水平移動振幅の位相変化の一例である。トレンチの有無にかかわらず、高濃度層内の粒子は上層水水粒子の位相よりも先に進んでいることがわかる。これにより、ピストン板が高濃度層の流動に直接影響を与えていないことが明らかとなった。また底面付近に近づくほど位相差が大きくなることが確認された。これについては高濃度層内の流動がこの層に作用する圧力勾配 $\partial p/\partial x$ （ x :水平方向座標軸）と高濃度層上側界面に作用する剪断応力 τ_b によって支配されていること（楠田ら、1993）をもとに、線形化した二層モデルにより図-2-bのようにうまく再現できた。ただし図-2-bの計算では層内での粘性係数を高さ方向に一定としている。本実験のように周期的に変動する外力下では、時々刻々と変化する体積濃度や剪断歪みとともに粘性係数も変化しており、その周期性を考慮する必要がある。この点はこれらをモデル化するための構成則とともに今後の課題である。

図-3は、水のみが水槽を満たした場合にその底面に作用する剪断応力の一周期平均値 τ_b と高濃度層内の平均濃度 $\bar{C}_d$ を初期濃度 C_0 でいずれも無次元化したものの関係を既存のデータ（山西、1990）と共に示したものである。 τ_b を大きくすると $\bar{C}_d/C_0$ は減少し、 τ_b を小さくすると $\bar{C}_d/C_0$ は増加する。しかしながら、ある定常状態から τ_b を増加させる場合と逆に減少させる場合とでは、 τ_b の変化の割合にかなりの差異が現われる。これは一度弱い剪断応力下で底面に沈積した微細粒子群は相互の接触によって粘着したようになり、上層水中へ巻き上げられにくい粒子間構造が形成さ

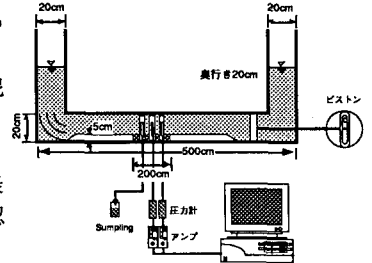


図-1 振動流水槽模式図

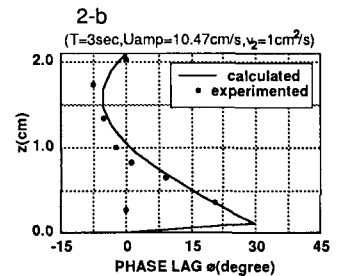
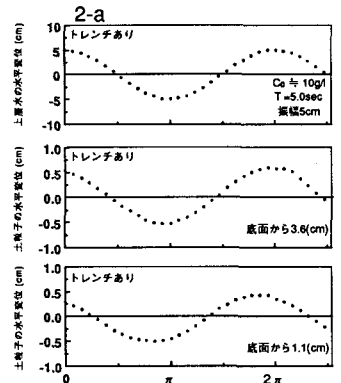


図-2 位相変化の一例

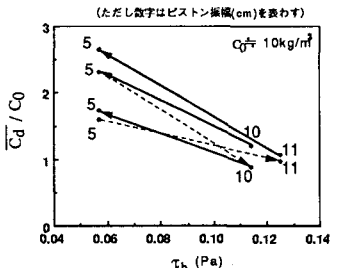


図-3 底面剪断応力と層内平均濃度

れた為である。したがってこのような場合には可逆過程とならない。

図-4は初期濃度 $C_0 \sim 10 \text{ kg/m}^3$ でピストン振幅を10cmから5cmに変化させた場合の濃度界面高の経時変化である。この濃度界面高は実験開始後1時間で定常となる。また水路側面からの目視及び濃度分布測定結果（図-5参照）から水路底面より17cmと1cm付近に2つのルートクライン（濃度界面）が形成されていたことが解かる。さらに実験開始から180分後にピストン振幅を減少させたところ、2つのルートクラインは1つのルートクラインになり（図-4参照）、不動層厚は0.3mmから35mmに急激に増加した。これはピストン振幅の減少に伴い、層内の浮遊懸濁物質のブロック形成が促進され、沈降・沈積フラックスが増加したためである。また図-4で示すように界面は約一時間程度で落ち着き、上層水層内の平均濃度も定常値 C_∞ へと近づいている。

図-6は沈降限界剪断応力 τ_{cd} （ここでは 0.05 Pa としている）で無次元化した有効底面剪断応力 $\tau_b/\tau_{cd}-1$ に対する上層水層内の無次元濃度 C_∞/C_0 （ C_0 ：初期濃度）を、実験結果をもとにプロットしたものである。この図から無次元底面剪断応力と無次元濃度との間には非線形の関係が存在し、その上層水層内無次元平均濃度の予測式として次式が考えられる。

$$C_\infty/C_0 = \alpha(\tau_b/\tau_{cd}-1)^n \quad (1) \quad \alpha, n: \text{定数}$$

図中の実線は α, n の値としてそれぞれ 9.69×10^{-4} 、 3.13 を選択した場合の計算結果である。さらにこれから無次元底面剪断応力 $\tau_b/\tau_{cd}-1$ が約 0.9 、つまり底面剪断応力が約 0.5 Pa を越えると $C_\infty = C_0$ となり、槽内は完全混合の状態で高さ方向に一律の濃度分布となる。さらに式（1）と層内の物質保存式から高濃度層内の平均濃度をある程度予測することが可能となる。

また、図-4より高濃度層内の粒子は沈積せず、ある層厚を保持しつつ流動していることがわかる。この層厚が保持される理由として、①粒子に作用する圧力勾配の影響、②剪断流によって生じる混合の効果、③層内に作用する浸透水圧、④粒子間接触に伴う有効応力の影響などが考えられる。有効応力の効果は、実験によって得られる濃度分布から過大に見積ったとしてもたかだか 1 mm のオーダーでしかなく、有効応力のみが浮泥層を保持する原因とはならない。上向きの浸透水圧の影響も無視できない（熊谷、1994）ものの、これが高濃度層保持の主因とはならず、単に圧密を抑制する働きをもたらすだけのものである。

4. 結論

- (1) 層内の粘性および底面の存在による流速の減衰と周期変化する水平方向の圧力勾配による流体の加速との重量により、底面近くの高濃度層内粒子は上層水粒子に比較して位相が先行する。
- (2) 同一の水理条件下であっても、水槽内の初期状態の差異により高濃度層内に保持される濃度は変化する。
- (3) 上層水の無次元濃度は無次元底面剪断応力の関数であり $C_\infty/C_0 = \alpha(\tau_b/\tau_{cd}-1)^n$ （ α, n ：定数）と表される。
- (4) 鉛直方向の圧力の変動により、高濃度層内の粒子群の沈降・圧密が妨げられる。

<参考文献>

- 楠田哲也・山西博幸・末次敏弘(1991):「振動流下における高濃度層の形成過程とその特性」、海岸工学論文集 第38巻、pp.231~235。
- 楠田哲也・山西博幸(1993):「振動流中で形成される高濃度浮泥層の保持機構に関する基礎的研究」、海岸工学論文集 第40巻、pp.346~350。
- 熊谷博史・山西博幸・楠田哲也(1994):「高濃度層の流動機構」、平成5年度西部支部研究発表会講演概要集、pp350-351
- 山西博幸(1990):「波動下における底泥及び懸濁物質の輸送に関する研究」、九州大学修士論文資料。

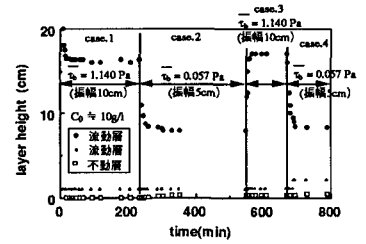


図-4 界面の経時変化

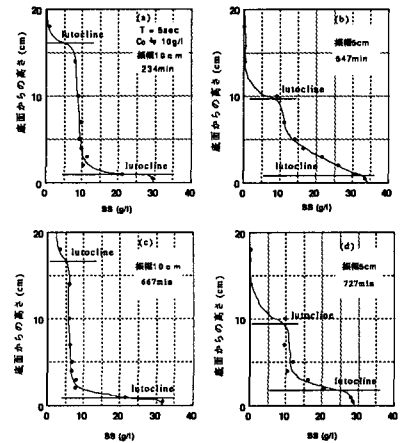


図-5 濃度分布

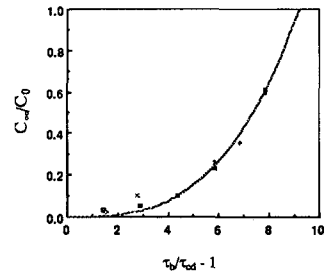


図-6 無次元底面剪断応力と上層水層内無次元濃度