

波・流れ共存場における底泥の巻き上げ速度に関する実験的研究

九州大学工学部 学生員 ○衛藤 誠 正 員 山西博幸
同 上 フェロー 楠田哲也

1. はじめに

柔らかい底泥が広く堆積した場所では波や流れにより、底泥の巻き上げ、移動、沈降といった現象が繰り返されている。これらの現象は港湾構造物や航路埋没、あるいは底泥が汚染されている場合には、底泥の再浮上により水質汚濁といった環境問題を引き起こす。したがって、これらの問題解決にも、底泥の挙動を把握する必要がある。従来、底泥の巻き上げに関する研究の多くは、波のみあるいは流れのみに対し行われてきた。一方、シルテーションが問題となる沿岸域の多くは波と流れが共存する場である。

本研究では、波と流れが同時に発生できる装置による実験を行い、経時的な底泥の巻き上げ量から巻き上げ速度を求め、これより波・流れ共存場での底泥の巻き上げについての検討を行うものである。

2. 実験装置及び方法

実験には全長 14.0m、幅 0.5m、深さ 1.0m のアクリル製直線造波水路を用いた(図-1)。また、この水路に設置されたバルブを操作することにより、水路内に順流(流れの向きが波の進行方向と同じ)と逆流(流れの向きが波の進行方向と反対)が起こせるようになっている。底泥には市販のカオリン ASP 600 (比重 2.66、中央粒径 $0.64 \mu m$) を用い、これを比重 1.025 の塩水にて含水比を 100% 程度に調整したものを水路中央に厚さ 0.1m、長さ 4.0m にわたり敷設した。これに比重 1.025 の塩水を水深 0.267m になるように注入した。実験はまず流れのみを一定時間作用させ(30 分間)、流れによる巻き上げを観測し、その後所定の波(流れが存在せず、波のみを作用させた条件で周期 $T=1.1$ 秒、固定床 X_1 での波高 H_0 が 9.9cm の波)を発生させた。採水は底泥敷設部両端 (X_1 、 X_3) 及び中央 (X_2) の 3 カ所にて、水路側面の所定の高さ毎(底泥表面から 0.5、1、2、3、5、7、10、15、20cm の 9 点)に設置したステンレスパイプ (2.4mm ϕ) を用いて経時的に行った。SS 濃度の測定には濁度計(分光光度計 $\lambda = 660nm$)を用いた。さらに底泥敷設中央部では底泥内の間隙水圧の測定も行った。なお、本実験での条件を表-1 に示す。

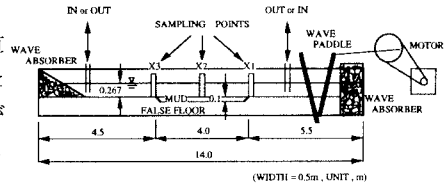


図-1 実験装置

表-1 実験条件

	含水比 W(%)	比スランプ値 S_L/H				断面平均流速 U (cm/sec)	周期 T (sec)	入射波高(固定床) H_0 (cm)
		JIS*(空中)	JIS*(水中)	九大型***(空中)	九大型***(水中)			
RUN1	93.8	0.54	0.23	0.57	0.22	8.7	1.1	9.9
RUN2	102.0	0.58	0.23	0.55	0.25	9.1	1.1	9.9
RUN3	97.3	0.58	0.19	0.55	0.22	0.0	1.1	9.9
RUN4	97.9	0.57	0.23	0.58	0.22	5.2	1.1	9.9

* JIS A 1109 鉄製フローコン (上層径 38mm、下層径 80mm、高さ 74mmの円すい台形)
** 九大型スランプコン (上層径 80mm、下層径 100mm、高さ 100mmの円すい台形)

実験はまず流れのみを一定時間作用させ(30 分間)、流れによる巻き上げを観測し、その後所定の波(流れが存在せず、波のみを作用させた条件で周期 $T=1.1$ 秒、固定床 X_1 での波高 H_0 が 9.9cm の波)を発生させた。採水は底泥敷設部両端 (X_1 、 X_3) 及び中央 (X_2) の 3 カ所にて、水路側面の所定の高さ毎(底泥表面から 0.5、1、2、3、5、7、10、15、20cm の 9 点)に設置したステンレスパイプ (2.4mm ϕ) を用いて経時的に行った。SS 濃度の測定には濁度計(分光光度計 $\lambda = 660nm$)を用いた。さらに底泥敷設中央部では底泥内の間隙水圧の測定も行った。なお、本実験での条件を表-1 に示す。

3. 実験結果及び考察

図-2 は RUN 1、2、4 での波を発生させる前の流速分布を示す。どの場合も流れのみでは巻き上げはほとんど生じないが、これに波が加わると巻き上げが生じ始めた。これは鶴谷ら (1988) と同様の結果であり、波による外力の重畳が底泥の巻き上げに大きく関与していることを示すものである。

図-3 は入射波高 H_1 と底泥中央部での波高 H_2 より求めた波高減衰率 k_1 の経時変化である。なお波高減衰率 k_1 は鶴谷ら (1988) に従い、次式にて定義した。

$$H_2 = H_1 \exp(-k_1 x) \dots (1)$$

ここで H_1 は X_1 ($x=0$) での波高、 x は伝播距離である。多少データにばらつきはあるものの、時間の経過とともに波高減衰率が低下している。中野 (1994) は、底泥を Voigt モデルと仮定し、弾性係数を含んだ形での複素粘性係数を用い、波高減衰係数の弾性係数による変化を調べている。これによると、本実験での含水比 (弾性係数 $G=175Pa$) では底泥上の

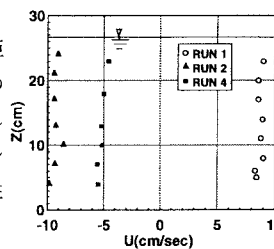


図-2 流速分布

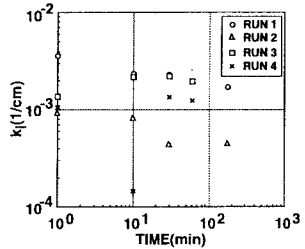


図-3 波高減衰率の経時変化

波高減衰率は弾性の効果が小さいほど減少する傾向にあることを理論的に明らかにしている。実験より考察すると、これは時間の経過とともに底泥上層部より浸入した塩水が底泥含水比の上昇をもたらし、底泥を柔らかくする状況と一致する。ただし、この含水比上昇は常時、底泥の巻き上げ促進につながるわけではない。底泥表層部では流れと直角方向に数多くの縦すじと細かな凹凸の形成とともに底泥硬化を引き起こし、これが底泥の巻き上げ量の低下をもたらすものと考えられるからである（山西ら、1988）。

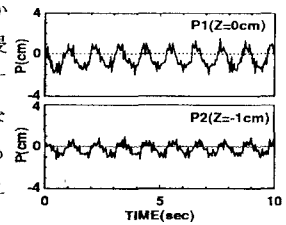


図-4 間隙水圧の経時変化

図-4は波のみを作用させたRUN3の実験開始1分後における底泥表層部での変動間隙水圧（静水圧分を取り除き、水頭換算したもの）の結果である。Z=0cmは底泥直上部、Z=-1cmは底泥面より1cm深い場所での値である。底泥面直上部での水圧変動は底泥内へそのまま作用せず、振幅の減衰と位相の遅れをもたらしながら下層へ伝達されている。これはいわゆる地盤の液状化及び高密度化を引き起こす原因となっている（善ら、1987）。図-5は善ら（1987）の解析に準じて変動過剰間隙水圧を図-4より算出したものである。底泥が完全に飽和状態で、実験開始1分程度では鉛直方向の含水比変化はないものとするれば図中、点線より下側が液状化条件を満たすものである。図-5より、この場合には液状化が生じるか生じないか程度の変動であり、これは楠田ら（1988）の実験結果と比較して、本実験での底泥の巻き上げが多量に生じなかった実験結果とも一致している。また、時間の経過とともに液状化の生じる度合いは増加していく傾向にあった。

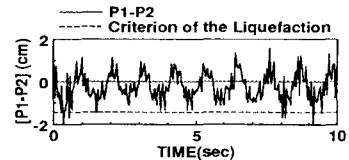


図-5 変動過剰間隙水圧の経時変化

図-6は底泥の巻き上げ量の経時変化である。巻き上げ量はSS分布より算出される総懸濁物質質量を底泥面積で除して求めた。巻き上げ量Wは実験開始

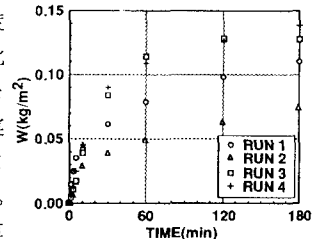


図-6 巻き上げ量の経時変化

初期において急激に増加し、時間経過とともにその増加速度は減少していく。これは時間とともに底泥表層部からの巻き上げが減少していることを意味する。したがって底泥の巻き上げを評価するには実験開始初期の勾配、すなわち巻き上げ速度が重要である。ここでは楠田ら（1988）と同様、巻き上げ量Wの経時変化より初期巻き上げ速度Eを算出した。これを底面に作用する剪断応力 τ_w の最大振幅と関係づけたものが図-7である。なお、 τ_w は層流境界層と仮定した場合の波作用下での理論底面剪断応力 τ_w （楠田ら、1988）を適用する。

$$\tau_w = -(\sqrt{2}\mu\beta\sigma H/2/\sinh kh) \cos(kx - \sigma t - \pi/4) \dots (2) \quad \beta = (\sigma/2\nu)^{1/2} \dots (3)$$

ここで、 μ ：粘性係数、 ν ：動粘性係数、 σ ：角振動数、H：波高、k：波数、h：水深である。また実験より水路内の流速Uは鉛直方向にはほぼ一樣なので（2）式中の波数kは次式より求められる（首藤、1981）。

$$(\sigma - kU)^2 = gk \tanh kh \dots (4)$$

同図中には楠田ら（1988）が行った実験結果も同時に示している。これによるとEは τ_w の増加とともに増加することがわかる。したがって、楠田ら（1988）と同様に巻き上げ速度Eは適当な無次元化（例えば、巻き上げ限界剪断応力 τ_c により無次元化した有効剪断応力）により表示することが可能である。今回の実験範囲内では巻き上げ速度がやや小さめであったことから、今後もさらに実験を行い、底泥の巻き上げに及ぼす波と流れの影響について理論的に検討を加えていく予定である。なお本実験の遂行に当たり、文部省科学研究費奨励研究（A）及び財団法人前田記念工学振興財団より補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

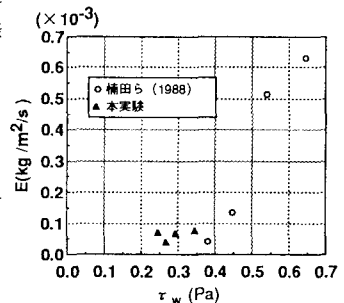


図-7 底面剪断応力と初期巻き上げ速度との関係

【参考文献】 楠田ら（1988）：第35回海岸工学講演会論文集、pp.352-356、首藤（1981）：『海の波の水理』、212p、善ら（1987）：港湾技術研究所報告、第26巻、第4号、pp.125-180、鶴谷ら（1988）：第35回海岸工学講演会論文集、pp.357-361、中野（1994）：京都大学学位論文、212p、山西ら（1988）：昭和62年度西部支部研究発表会講演概要集、pp.148-149。