

II-83

波と流れによる底泥の巻き上げ特性に関する実験的研究

九州大学工学部 正会員 山西博幸
同 上 フェロー 楠田哲也
佐 藤 組 衛藤 誠

1.はじめに 底泥の巻き上げ、移動、沈降といった現象は、河口閉塞や河道断面の狭小化あるいは港湾構造物や航路の埋没といった河川・港湾の維持管理問題をはじめ、水質汚濁などの水環境問題を引き起こしている。これらシルテーション問題の解決には、底泥の輸送機構について十分な知識が必要である。従来、底泥の巻き上げに関する研究は、波あるいは流れの作用のいずれかについて行われてきた。しかしながら、これら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。したがって、本研究では波・流れ共存場における底泥の巻き上げ特性を検討する。

2.実験装置及び方法 実験には波の進行方向に対して順流と逆流が起こせるようになっている全長14.0m、幅0.5m、深さ1.0mの亚克力製直線造波水路を用いた。試料には市販のカオリン ASP 600（比重2.66、中央粒径 $0.64\mu\text{m}$ ）を使用し、これを比重1.025の塩水で含水比100%程度に調整後、水路中央部に設けたトレンチ（長さ4.0m×幅0.5m×深さ0.1m）内に敷設した。なお、底泥の含水比調整には、底泥の流動特性を示す一つの指標であるスランプ試験を援用した。底泥

表-1 実験条件

	含水比 W (%)	比スランプ値*		降伏値** τ_y (Pa)	断面平均流速 U (cm/s)	周期 T (s)	入射波高*** H_0 (cm)
		S_L/H (空中)	S_L/H (水中)				
RUN1	93.8	0.57	0.22	18.9	8.7	1.1	9.9
RUN2	101.8	0.55	0.25	17.9	-9.2		
RUN3	97.4	0.55	0.21	19.7	0.0		
RUN4	97.9	0.58	0.22	18.2	-5.2		
RUN5	95.8	0.55	0.25	18.3	4.7	1.1	11.2
RUN6	98.5	0.55	0.22	19.2	7.6		
RUN7	97.3	0.55	0.25	18.2	-7.9		
RUN8	92.8	0.56	0.24	18.6	0.0		
RUN9	95.4	0.55	0.24	18.7	0.0	1.1	10.7

*円錐台形コーン（上下面径80,100mm、高さ100mm）。

**降伏値は清水ら（1991）の式より算出した。

表中の値は空中と水中での値の平均値である。

***固定床上、流れのない場合の底泥敷設端部（沖側）における波高。

敷設後、比重1.025の塩水を水深0.267mになるように水路内に注入し、所定の水深に設定した。実験は、まず流れのみを一定時間（30分間）作用させ、流速測定及び流れによる巻き上げの観測を行い、その後、所定の波を発生させた。採水時には水界内の濃度分布に影響を及ぼさぬよう配慮し、水路側面の所定高さ毎に設置したステンパイプにより採水を行った。流れや水路長の影響も考慮し、底泥敷設部両端及び中央部の計3カ所にて採水した。波高の測定点は、底泥敷設端部（沖側）及び底泥中央部の2カ所とした。さらに底泥敷設中央部で同時に底泥内の間隙水圧も測定した。なお、本実験での条件を表-1に示す。

3.実験結果及び考察

(1) 流れによる波の変形 理論上、波に流れが加わると順流条件では波長増加、波高減少、逆流条件では逆の波の変形をもたらすことは明らかであり、固定床における予備実験からもほぼこれを満足していることを確認した。図-1は、泥床での流速・群速度比 U/C_g の変化にともなう波高比 H_2/H_{20} である。ただし、 H_2 は（波+流れ）の場合の底泥敷設中央部 X_2 での波高、 H_{20} は波のみの場合の X_2 での波高である。図中には同時に固定床において理論上求められる計算結果も示している。泥床では固定床の場合より全体的に波高が減衰する。これは固定床上の場合に生じる境界層内の粘性によるエネルギー消費に加え、泥床の場合、底泥の波動運動にともなうエネルギー消費が波高減衰に大きく関与しているためである。

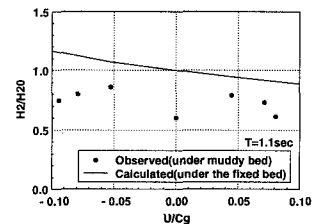


図-1 U/C_g の変化に伴う H_2/H_{20}

(2) 底泥表層部での間隙水圧変動 図-2、3は実験開始初期における底泥表層部での間隙水圧変動（静水圧分を取り除き水頭換算したもの）の一例である。P1は底泥直上部、P2は底泥面より1cm深い場所での値である。水圧の変動は底泥内へそのまま作用せず、振幅の減衰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し（善ら、1987）、底泥内部の降伏値を低下させ、底泥の巻き上げに影響を及ぼす。また、図-2と3ではその間隙水圧変動の様相に大きな差異がみられる。図-2ではその変動が静水

時を中心に周期的に変動しているものの、図-3では時間の経過と共に残留・上昇している。これは本実験で取り扱うような粘土質の場合、砂質土と比べその透水係数が非常に小さく（通常、 $k = 10^{-6}$ cm/sのオーダー）、周期的な直応力の作用に対して、非排水状態での等体積変化となり、周期的変動毎に過剰間隙水圧の発生・残留を生じさせるものと推測される。本実験範囲においては、作用する波高の増加及び巻き上げ量の増加と相まって、間隙水圧変動が時間の経過とともに残留・上昇していく場合がみられた。Foda and Tzang(1994)は波によるシルト質底泥内の間隙水圧測定から、間隙水圧の急激な上昇と層内に間隙水圧が残留・上昇することを示し、その応答形態を間隙水圧の共振状態の有無などにより3つに分類した。本実験での平均間隙水圧の上昇形態は、彼らによる応答分類での非共振流動状態に属していた。

(3) 巻き上げ速度に関する検討 図-4は巻き上げ量 W の実験開始初期の勾配より求めた初期巻き上げ速度 E と底泥面に作用する最大底面剪断応力 τ との関係を示したものである。各実験での底泥の巻き上げ量 W はSSの鉛直方向濃度分布より水路内の総懸濁物質量を算出し、これを底泥敷設面積で除して求めた。波・流れ共存場での最大底面剪断応力 τ_{wf} の算出には、全てのflow regimeに適用可能な完全陽形式である田中・THU(1993)の式を用いた。なお、添字 w 、 f はそれぞれ波、流れを表している。ここで E_{wf} はある限界値 τ_{cwf} を越えた後、 τ_{wf} の増加とともに指数関数的に増加していくものとする。このとき、この限界値、すなわち巻き上げ限界底面剪断応力 τ_{cwf} は図-4より外挿して求めることができる。これより無次元有効剪断応力を求め、これと巻き上げ速度との関係を両対数紙上にプロットしたものが図-5である。図より無次元有効剪断応力と巻き上げ速度の関係が次式で表される。

$$E_{wf} = E_w^* \left(\frac{\tau_{wf} - \tau_{cwf}}{\tau_{cwf}} \right)^m \dots (1) \quad E_w = E_w^* \left(\frac{\tau_w - \tau_{cw}}{\tau_{cw}} \right)^n \dots (2)$$

ここで $\tau_{cwf} = 0.05$ Pa、 $\tau_{cw} = 0.17$ Pa、 $E_w^* = 2.75 \times 10^{-3}$ kg/m²/s、 $E_w = 1.86 \times 10^{-4}$ kg/m²/s、 $m=n=1.36$ である。なお、 E^* は $\tau = 2\tau_c$ のときの値であり、 τ_c の関数で表される(Maa and Mehta, 1987, 末次ら, 1990)。 τ_c の評価については空隙率(含水比)の関数として表示した海田らの式(1988)や底泥の降伏値 τ_y との関数として表示した鶴谷ら(1988)、中野ら(1991)の式がある。清水ら(1991)は、底泥内部での τ_y を考慮した巻き上げ速度式を提案しているが、巻き上げ速度自身の無次元化に問題を残している。ここでは(1)、(2)式より E を E^* にて無次元化し、図-5を整理したものが図-6であり、流れの有無に関わらずデータのまとまりは比較的良好となった。以上から、巻き上げ速度は有効剪断応力に依存し、 E^* をどのような形で評価するかが今後の課題として残る。

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。

【参考文献】 海田ら(1988)：土木学会論文集、No.393/II-9、pp.33-42。清水ら(1991)：海岸工学論文集、第38巻、pp.481-485。末次ら(1990)：西部支部研究発表会講演集、pp.234-235。善ら(1987)：港湾技術研究所報告、第26巻、第4号、pp.125-180。田中ら(1993)：土木学会論文集、No.467/II-23、pp.93-102。鶴谷ら(1988)：第35海岸工学講演会論文集、pp.357-361。中野ら(1991)：海岸工学論文集、第38巻、pp.461-465。Foda and Tzang(1994)：J.Geo.Res., vol.99, pp.20463-20475。Maa and Mehta(1987)：Continental Shelf Res., vol.7, pp.1269-1284。

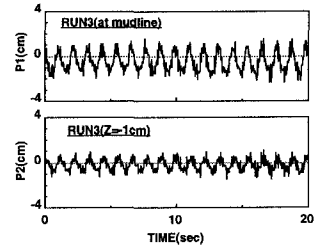


図-2 間隙水圧変動 (RUN3)

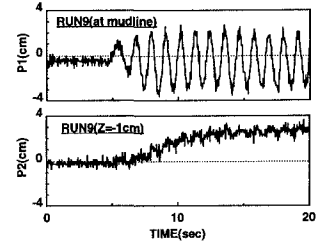


図-3 間隙水圧変動 (RUN9)

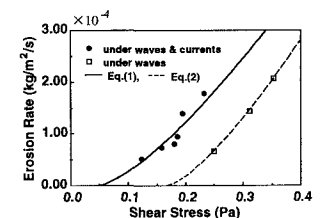


図-4 剪断応力と巻き上げ速度との関係

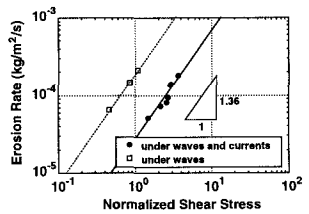


図-5 無次元剪断応力と巻き上げ速度との関係

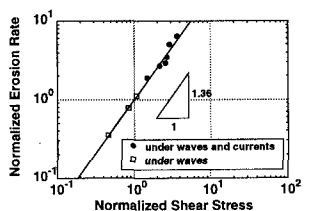


図-6 無次元剪断応力と無次元巻き上げ速度との関係