

流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究

鶴谷 広一*・江口 秀二**・鷹 濱 潤***

1. ま え が き

海域の底泥は、比較的波の大きな場合に容易に巻き上がり、これが潮流に運ばれて港湾や航路の埋没（シルテーション）を引き起こす。そのため、軟弱な底泥の存在する場所での港湾の設計や維持管理では、シルテーションをいかに予測し、制御するかが重要な問題となっている。特に、底泥の巻き上がりの機構を解明することは、シルテーションのモデル化のために是非とも必要である。海域で通常航路の埋没が問題になるようなところでは、流れと波が同時に存在するのが普通である。しかし、これまでは流れだけ、あるいは波だけが作用したときの底泥の巻き上げに関する研究が主なものであった。

潮位差の大きなエスチュアリーにおける港湾や航路の埋没対策の検討のために、イギリスの H.R.S. が1950年代から総合的な研究を行ってきているが、ここでは流れによる検討が主で、波の影響を直接考慮していない¹⁾。

Partheniades²⁾ は、流れによる底泥の巻き上げについて実験的検討を行い、巻き上げ率が底面に働くせん断応力に強く依存することを見だし、両者の関係を求めた。大坪・村岡³⁾ は、底泥の飛び出し量の検討の中で、底泥を連続体および粒状体として取り扱い、両者を比較した。そして粒状体としての取り扱いが適当であると結論し、無次元飛び出し率が破壊限界で無次元化されたせん断応力で統一的に表されることを示した。海田他⁴⁾ は、円形回転水路を用いた底泥の巻き上げ実験から、初期の巻き上げ率が、有効せん断応力を巻き上げの限界せん断応力で無次元化したもののべき乗で表されることを示した。

一方、波による底泥の巻き上げに関する研究は、Thimakorn⁵⁾、川添他⁶⁾、柴山他⁷⁾ によってなされている。柴山他は、カオリナイト粘土に大坪・村岡³⁾ が用いた無次元表示を適用し、無次元飛び出し率が無次元せん断応力のべき乗で表されることを示した。流れのみ、あるいは波のみのいずれの場合でも、巻き上げ率と底面に

働くせん断応力は、適当な無次元化を行うことによってべき乗の関係で結ばれている。しかし、例えば熊本港のようにシルテーションが問題となるような場所では、通常潮位差が大きいため潮流もかなり大きく、波と流れが同時に存在することが多い。したがって、現地海域でのシルテーションを検討する場合には、流れと波の共存場での底泥の巻き上げの機構について十分な知識を持つ必要がある。そこで、本研究は実験水路を用いて、底泥に波と流れを作用させてその巻き上げ率を測定し、これと底泥に作用するせん断応力との関係を調べることで、流れと波の共存場での底泥の巻き上げについて検討を行ったものである。

2. 実験方法

(1) 底泥の巻き上げに関する実験

実験には、長さ 11m、幅 0.4m、高さ 0.5m の二次元造波水路を用いた。この水路には、図-1 に示すようにプランジャー型造波装置が設置され、水路の下部には流れを起こすための廻流装置が付属している。水路中央の測定部は両面ガラス張りで、長さが 4m ある。この部分の床は 4 連ジャッキで支えられ、上下に移動が可能である。座標軸は、泥層のプランジャー側の端の静水面上に原点をとり、波の進行方向に x 軸、鉛直上方に z 軸をとる。ここで、波の進行方向と同じ方向の流れを順流、逆方向の流れを逆流と呼び、順流を +、逆流を - で表す。

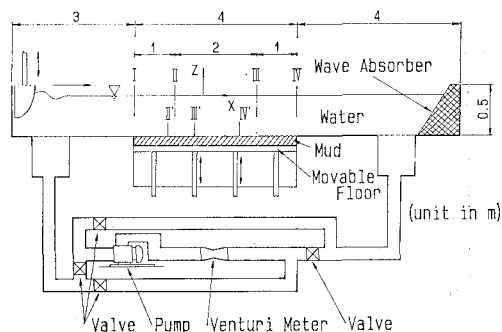


図-1 実験水路

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

*** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

波および流れの条件を表-1に示す。流速の条件は、 $\pm 12.5 \text{ cm/s}$ と $\pm 25.0 \text{ cm/s}$ の4ケースである。波の周期は1.2秒と0.8秒の2ケースで、それぞれの周期に対して波高を2cmから6cmまで変化させた。用いた底泥はカオリナイト(ASP 600, 真比重 2.618)で、底泥の表層部の含水比が約200%となるように調節した。

測定項目は、波高、波長、懸濁水のSS濃度(巻き上げ量)、含水比である。

波高は、図-1のⅠ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳの四カ所に設置した容量式波高計によって測定した。巻き上げ量は、ⅠとⅣに設置したサイフォンから懸濁水を採取して求めた。流れがポンプ内を循環していることから、濃度の鉛直分布は流れが底泥層に流入する手前ではほぼ一様となっているので、サイフォンは、順流+波ではⅠの位置に、また逆流+波ではⅣの位置に設置した。サイフォンによる採水は、両測点とも底泥表面から5cm($z=-15 \text{ cm}$)と15cmの位置($z=-5 \text{ cm}$)の二カ所で行った。SS濃度の測定は、JIS K 0102 14.1 懸濁物質の測定法によった。

底泥の含水比の測定は次のように行った。まず、直径7cmの亚克力製の円筒を底泥内に静かに挿入して底泥を採取した。次に採取した底泥を上部から2cmずつ五分割して、それぞれの含水比を求めた。含水比を測定するための底泥の採取は、図-1の測点ⅠとⅢで実験直前と直後に行った。実験前と実験後の含水比を比べると、底泥の下層部では圧密の影響で含水比は10%程度減

少しているが、上層部に近い部分ではほとんど変化が見られなかった。このことから、今回の底泥の巻き上げの実験では、実験中の含水比の変化は無視し得ると考えた。底泥は実験前日に作成し、水中に一晩放置した後に実験を開始した。実験では、まず底泥に流れだけを数時間作用させ、底泥が巻き上がらないことを確かめた上で、さらに波を加えた。以後、ある適当な時間間隔で懸濁水を採取して濃度の測定を行った。

(2) セン断応力の測定

底泥に作用するせん断応力は、底泥が運動しているために固定床の場合と比べて異なるものと考えられる。しかし、波と流れが同時に作用する場合の底泥面上に働くせん断応力を直接測定する、あるいは推定することは困難なので、今回は、固定床上に働くせん断応力を直接測定し、これが底泥面上でも同じように作用すると考えた。底泥に作用するせん断応力を求めるために、図-1の水路中央の測定部を固定床にし、Ⅱ'($x=84.5 \text{ cm}$)、Ⅲ'($x=149.5 \text{ cm}$)、Ⅳ'($x=259.5 \text{ cm}$)の位置にせん断力計(三計エンジニアリング, S10 W-01, 容量 1.27 Pa)を設置した。同時にそれぞれのせん断力計の直上の位置には、波高計も設置し、波高とせん断応力の関係を調べた。せん断力計からの出力電圧は、30 Hz のローパスフィルターを通した後に、AD変換して磁気テープに記録した。

3. 実験結果

(1) 波高減衰率

図-2は表面波の波高 H と伝播距離 x の関係の一例を示したものである。同じ周期の波($T=0.8 \text{ s}$)で、流速の絶対値が同じ場合には、逆流の場合(○印)の方が順流の場合(●印)よりも減衰率がかなり大きい。これは、逆流中では波のエネルギー輸送速度が順流よりも小さいため、同じ伝播距離に対して相対的に大きな距離を伝播したことになり減衰率が大きくなったものである。さらに、周期が1.2sで順流の場合には、流速の小さい $\bar{U}=12.5 \text{ cm/s}$ (△印)のほうが流速の大きい $\bar{U}=25.0 \text{ cm/s}$ (▲印)の場合よりも減衰率が大きくなっている。これらの結果は、浅野⁹⁾と定性的に同じ傾向を示している。いずれにしても、波高 H と伝播距離 x は片対数紙上で直線関係にあることから、波高の x 方向の分布は次の式(1)で表される。

$$H = H_0 e^{-k_i x} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 H_0 は $x=0$ の位置での波高、 k_i は波高減衰率である。

(2) 巻き上げ率

図-3は、最初流れのみを作用させ、その後で流れ+波を作用させた場合の作用時間とSS濃度の関係を示したものである。図中には、順流+波と逆流+波のケース

表-1 実験条件

実験番号 (Case)	周 期 (sec)	平均流速 (cm/sec)	含 水 比 (%)
6	1.2	25.0	203.7
7	0.8	25.0	199.0
8	0.8	-25.0	190.9
9	1.2	-25.0	218.6
10	1.2	12.5	207.0
11	0.8	12.5	197.1
12	1.2	25.0	186.9
13	1.2	12.5	198.6
14	1.2	25.0	193.7
15	1.2	25.0	268.0
16	1.2	25.0	351.9
17	1.2	-12.5	212.7
18	1.2	-25.0	201.5
19	1.2	-12.5	204.0
20	0.8	-12.5	206.2
21	0.8	-25.0	200.4
22	0.8	-12.5	196.7
23	0.8	-25.0	204.8
24	0.8	-25.0	209.3
25	0.8	25.0	204.7
26	0.8	25.0	183.1
27	0.8	25.0	182.9
28	0.8	12.5	220.1
29	0.8	12.5	182.0

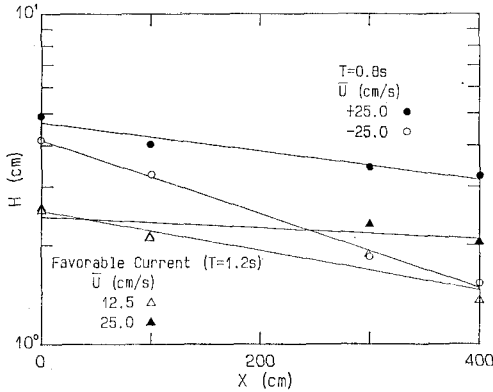


図-2 表面波の減衰

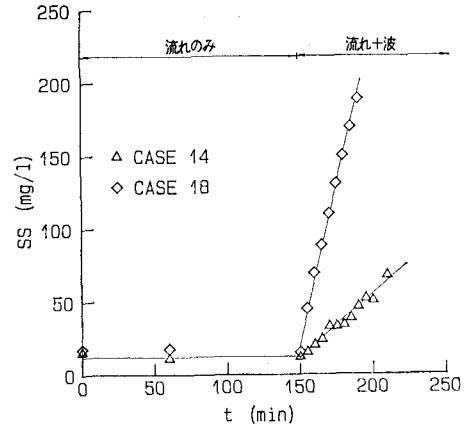


図-3 作用時間と SS 濃度の関係

表-2 実験結果

実験番号 (Case)	波 長 L (cm)	波 高 H_0 (cm)	波高減衰率 k_t (cm^{-1}) $\times 10^3$	平均巻き上げ率 $\bar{E}$ ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	$\bar{\tau}_{\max}/\tau_y$
6	174.0	4.17	1.130	6.78×10^{-4}	0.242
7	108.7	4.85	1.230	5.28×10^{-4}	0.258
8	49.2	4.44	2.720	1.80×10^{-5}	0.107
9	155.0	5.87	4.310	3.28×10^{-4}	0.375
10	158.9	4.80	1.350	9.17×10^{-5}	0.189
11	108.3	4.82	2.140	1.37×10^{-5}	0.170
12	193.8	2.14	0.892	2.25×10^{-5}	0.105
13	163.3	2.57	1.430	6.77×10^{-6}	0.091
14	193.8	2.17	0.424	1.66×10^{-5}	0.122
15	193.2	2.45	0.416	5.30×10^{-4}	0.471
16	187.5	2.58	0.849	8.20×10^{-4}	1.412
17	149.7	4.79	2.130	3.03×10^{-5}	0.209
18	129.9	2.99	3.710	6.78×10^{-5}	0.161
19	144.9	3.09	3.320	6.67×10^{-6}	0.199
20	75.9	4.89	3.440	3.83×10^{-6}	0.205
21	48.3	3.02	1.430	—	0.080
22	71.8	2.20	1.590	6.17×10^{-7}	0.083
23	51.4	3.10	1.310	—	0.090
24	55.4	2.87	1.640	1.67×10^{-4}	0.090
25	116.8	2.54	1.600	1.43×10^{-4}	0.134
26	113.5	2.26	0.533	—	0.078
27	114.1	2.41	0.000	—	0.082
28	112.5	2.43	1.030	3.88×10^{-6}	0.140
29	101.7	2.40	0.000	—	0.066

の代表的な例が示してある。両ケース共に、流れだけでは底泥は巻き上がらないが、これに波が加わるとすぐに巻き上がり始めることがわかる。また、SS 濃度と流れ+波の作用時間は線形の関係にある。底泥が舞い上がった他の実験ケースでも同様に線形の関係が得られた。これより、SS 濃度の時間変化率を求め、底泥の平均巻き上げ率 $\bar{E}$ を次式から計算した。

$$\bar{E} = \frac{dD}{dt} \cdot \frac{Q}{A} \dots\dots\dots (2)$$

ここに D は SS 濃度、 t は時間、 Q は水路を循環してい

る全水量、 A は底泥が敷き詰められている部分の表面積である。

表-2 に、各実験ケースの波長 L (cm)、波高減衰率 k_t (cm^{-1})、平均巻き上げ率 $\bar{E}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) などの実験結果を示す。

図-4 は、II'、III'、IV' の各位置での波高とせん断応力の振幅の関係である。値に多少のばらつきはあるが、今回の実験の範囲内では波高とせん断応力には線形の関係がある。図中に示した以外の波と流れの条件についても同様に線形の関係が得られている。

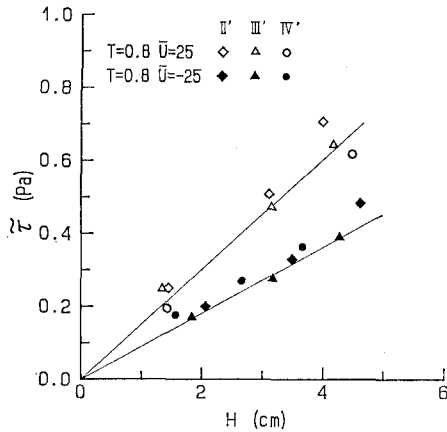


図-4 波高とせん断応力の振幅の関係

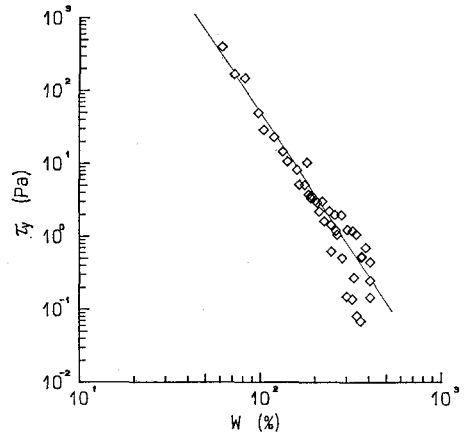


図-5 含水比と降伏値の関係

4. 巻き上げ率の評価

これまでの研究で提案された巻き上げ率の評価式は、底泥の巻き上げ率を、底泥に作用するせん断応力と関係づけている。例えば、流れのみが底泥に作用した場合の底泥の巻き上げ率 E あるいは無次元飛び出し率 P は式(3)⁴⁾ や式(4)³⁾ で表される。

$$E = \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)^\beta \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$P = \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)^\beta \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで α , β , τ_c は、定数であり、せん断応力が限界せん断応力 τ_c に達すると底泥は巻き上げられる。底泥に波が作用した場合の無次元飛び出し率も式(4)で評価されている⁷⁾。しかし、波のみが作用した場合の巻き上げ率と同じ巻き上げ率を流れのみで生じさせるためには、20倍程度のせん断応力が必要であるという報告もされている⁹⁾。これは、波が作用した場合の波動運動によるせん断応力の変動や圧力の変動が巻き上げに関与しているためと考えられる。しかし、せん断応力の変動と圧力の変動が巻き上げにどの程度の割合で関与しているかは今のところよくわかっていないため、ここではせん断応力のみに着目し、波動運動によるせん断応力の変動、波の周期、波長を含めた巻き上げ率の評価を行った。また、含水比の影響を考慮するために、底泥の物理特性値である降伏値 τ_y を用いた。

(1) 巻き上げ限界

底泥の巻き上げは、底泥表面に作用するせん断応力が、底泥内部のせん断応力(抵抗力)よりも大きくなったときに生じる。表-2には、各実験条件でのせん断応力の振幅の最大値を降伏値で割った $\bar{\tau}_{\max}/\tau_y$ と、実験で得られた巻き上げ率 $\bar{E}$ が示されている。 $\bar{\tau}_{\max}$ は波高 H_0 に対するせん断応力の振幅で、前述の波高とせん断応力の関係から求めた。図-5は、回転粘度計を用いて求めた含水比 W と降伏値 τ_y との関係であり、図中の

直線は式(5)で表される。

$$\ln \tau_y = -3.90 \ln W + 21.9 \quad \dots\dots\dots (5)$$

τ_y は各実験ケースでの含水比を式(5)に代入して求めた。表-2によれば、順流+波のケースでも逆流+波のケースでも $\bar{\tau}_{\max}/\tau_y$ が0.08以下では底泥は巻き上がっていない。従って、底泥の巻き上げ限界は、 $\bar{\tau} = 0.08\tau_y$ となる。

(2) 巻き上げ率の評価

底泥に流れと波が作用する場合のせん断応力は次式で表示される。

$$\tau = \frac{\bar{\tau}}{2} \cos(kx - \omega t) + \tau_d \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\bar{\tau}$ は振幅、 τ_d はゼロからの偏差である。底泥の表面に微小エレメントを考えた場合、せん断応力の振幅が $\bar{\tau} > 0.08\tau_y$ の条件を満たすと、エレメントには底泥からの拘束がなくなり巻き上げ状態となる。この状態でせん断応力が x 方向に変化すると、エレメントには $\frac{\partial \tau}{\partial x}$ の力が作用する。この力が巻き上げに関係すると仮定する。この力を F とすれば、 F は次式で表される。

$$F = \frac{\partial}{\partial x} \{ (\bar{\tau} - 0.08\tau_y) \cos(kx - \omega t) \} \quad \dots\dots\dots (7)$$

この力は半周期ごとに向きを変える。よって、同じ向きの力が作用し続ける時間は半周期である。巻き上げにはこの力の継続時間も関係すると考え、式(7)を半周期にわたり時間で積分すると次のようになる。

$$\int_0^{T/2} F dt = \frac{(\bar{\tau} - 0.08\tau_y) T}{L} \quad \dots\dots\dots (8)$$

さらに、せん断応力が底泥に及ぼす影響は、含水比の異なる粘土で同一ではないことから、上式を降伏値 τ_y で割り、含水比の影響を考慮する。これを、 μ , ρ , d_{50} で無次元化し、巻き上げ率の推定値 E_{est} とする。

$$E_{\text{est}} = \begin{cases} \frac{(\bar{\tau} - 0.08\tau_y)}{\tau_y} \frac{T}{L} \frac{\mu}{\rho d_{50}} (\bar{\tau} \geq 0.08\tau_y) \\ 0 & (\bar{\tau} < 0.08\tau_y) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

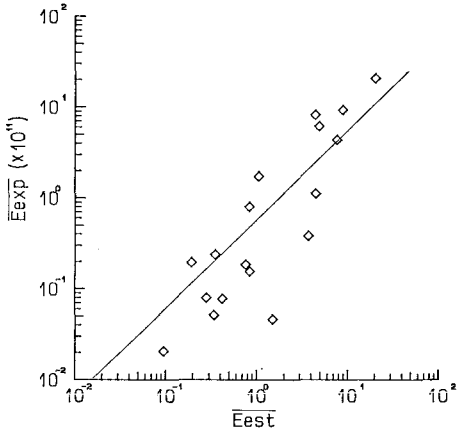


図-6 実験値と推定値の比較

ここで、 μ は底泥の粘度、 ρ は底泥の密度でそれぞれ含水比の関数である。また d_{50} は底泥の中央粒径である。実験で得られた巻き上げ率は、底泥層内の平均値であることから、式(9)を x 方向に積分し底泥層の長さ l で割ることにより、平均巻き上げ率の推定値 $\overline{E}_{est}$ を求めた。

$$\overline{E}_{est} = \frac{1}{l} \int_0^l E_{est} dx \quad \dots\dots\dots (10)$$

図-6 は $\overline{E}_{est}$ と実験結果 E の無次元量 $\overline{E}_{exp}$ の関係である。ここで $\overline{E}_{exp}$ は次式で表される。

$$\overline{E}_{exp} = \frac{\bar{E} d_m}{\mu} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ばらつきはあるものの、データは両対数座標で 45° の傾きを持つ直線の周囲に分布している。このことから式(9)による巻き上げ率の推定がほぼ妥当であったと考えられる。

今回の巻き上げ量の評価は、底泥に作用するせん断応力のみを考えた。しかし波動場はせん断応力の変動だけでなく圧力変動も生じている。今後は、この圧力変動も考慮した巻き上げ量の検討が必要である。

5. ま と め

流れと波の共存場における底泥の巻き上げに関する実験を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 底泥の巻き上げ量は、時間に比例して増加する。
- 2) 含水比 200% のカオリナイトの巻き上げ限界は $0.08\tau_y$ である。
- 3) 底泥に作用するせん断応力を実測し、その振幅と波の周期、波長を用いた巻き上げ率の推定値は、実験結果とほぼ一致した。

謝辞：本研究を行うにあたり、水理研究室の各位には実験の実施とデータの整理に多大なる協力をして頂いた。ここに記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 小笹博昭：英国国立水理研究所におけるエスチュアリーの新シルテーションに関する研究について、港研資料 No. 354, 56 p., 1980.
- 2) Partheniades, E. P.: Erosion and deposition of cohesive soils, Proc. A.S.C.E., Vol. 91, HY1, pp. 105~139, 1965.
- 3) 大坪国順・村岡浩爾：流れによる底泥の飛び出し率，土木学会論文集，第375号，II-6, pp. 43~52, 1986.
- 4) 海田輝之・楠田哲也・二渡 了・栗谷陽一：柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究，土木学会論文集，第393号，II-9, pp. 33~42, 1988.
- 5) Thimakorn, P.: An experiment on clay suspension under water waves, Proc. Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 2894~2906, 1980.
- 6) 川添正寿・蔵元利浩・二渡 了・楠田哲也：波による底泥の浮遊特性，第42回年次学術講演会概要集，pp. 648~649, 1987.
- 7) 柴山知也・中西雅明・石原 肇・佐藤慎司：波による底泥の浮遊機構に関する研究，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 271~275, 1987.
- 8) 浅野敏之：波と流れの共存場における水理特性に関する研究，京都大学学位論文，152 p., 1986.
- 9) 熊本港底泥舞い上がり実験報告書：運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所，146 p., 1987.