

流れおよび波による底泥の巻き上げ限界値の検討

鶴谷 広一*・江口 秀二**・佐々木 豊喜***

1. ま え が き

底泥の巻き上げは、底泥表面に作用する外力とこれに対する底泥の抵抗力の力学的関係により決定される。ここで外力は、潮流の場合は流れによるせん断応力、波の場合は波動運動によるせん断応力と圧力である。一方、巻き上げに対する抵抗力は、粘着性を持つ底泥では底泥粒子間に作用する物理・化学的結合力が支配的である。結合力は底泥の成分、含水比、温度など様々な要因の影響を受けるため、個々の底泥粒子に着目した結合力の微視的な評価は非常に難しい。これは、重力や摩擦力が支配的な砂質土とは大きく異なっている点であり、シルテーションが複雑な現象であるといわれる原因である。

したがって、巻き上げに対する底泥の抵抗力は、通常底泥が巻き上がり始めるときの外力（限界せん断応力）で表される。そして、底泥の巻き上げ量は、単位時間、単位面積からの巻き上げ量である巻き上げ率で評価されている。

Partheniades (1965) は、サンフランシスコ湾の現地泥を用いて流れによる巻き上げの実験を行い、巻き上げが始まるときのせん断応力と、巻き上げ率が急に増加し始めるせん断応力の二つの限界せん断応力があること、また前者は底泥の強度に無関係であり、後者は強度に依存することを指摘した。二種類の限界せん断応力が存在することは大坪 (1984) によっても確認されている。

限界せん断応力と底泥の物理特性値（土質力学で用いられている定数やレオロジー定数など）との関係を求めることは、限界せん断応力を推定する上で必要である。Kamphuis ら (1983) は、Mackenzie 川の底泥を用いて巻き上げの実験を行った。彼らは、底泥の表面に小さい穴 (small pit marks) が観察されたときを巻き上げ開始とし、限界せん断応力は底泥の圧縮強度およびベーンせん断強度と線形関係にあること、底泥の塑性指数や底泥内の粘土の含有量が増えると限界せん断応力は増加する

ことを明らかにした。大坪 (1984) は破壊限界と底泥の降伏値を比較し、両者はほぼ等しいことを明らかにしている。

底泥に波が作用すると、底泥表面には高濃度の浮遊層が形成されることはよく知られている。波による巻き上げ実験では、浮遊層の濃度分布や巻き上げ率と底面せん断応力の関係が主に調べられ、限界せん断応力に関する研究は少ない。その中で興味深い研究は、運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所 (1987) と楠田ら (1989) が行った、流れの場合および波の場合での限界せん断応力の比較であり、波の場合での限界せん断応力は流れの場合での限界せん断応力よりもかなり小さいことを明らかにしている。しかし、この理由についてはまだ明らかにされていない。

巻き上げ量の推定を行うためには、波および流れに対する統一された巻き上げ限界せん断応力の定義が必要である。本研究の目的は、底泥に作用する外力の違いを考慮し、開水路実験の結果と既往の研究結果をもとにして、統一された限界せん断応力を定義することである。

2. 巻き上げ実験

2.1 実験方法

a) 実験条件

本研究では、図-1 に示す長さ 11 m、幅 0.4 m、高さ 0.5 m の二次元造波水路を用いて 3 種類の実験を行った。各実験で底泥に作用する外力、水深、および底泥の厚さを表-1 に示す。流れは水路下部の廻流装置により、波は水路左にあるピストン型造波装置によって起こされる。用いた底泥は含水比 150~450% のカオリナイトである。含水比の調整は淡水で行った。底泥層の長さは 2 m

表-1 実験条件

実験の種類	外力	水深 h_w (cm)	底泥の厚さ h_m (cm)
実験 1	流れ	10	9.0
実験 2	波	30	0.5
実験 3	波	30	9.0

* 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 運輸省大臣官房国有鉄道改革推進部施設課
新幹線施設係長

*** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

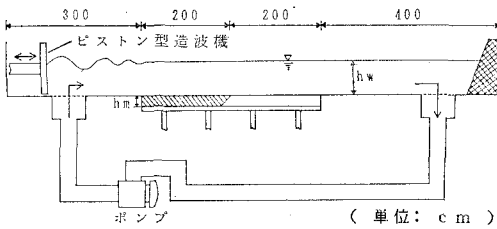


図-1 水路の説明図

である。実験1での最大流速は 66 cm/s, 実験2, 3での波の周期は 1.2 秒, 最大波高は 12 cm である。

実験2と実験3の違いは底泥の厚さである。これまで行われた波による巻き上げ実験では, 最も底泥層が薄い場合で 2.5 cm (Thimakorn (1980)) である。底泥層がある程度の厚さを持つと底泥内部の圧力勾配により底泥は波動運動する。しかし底泥層が 0.5 cm のような極端に薄い場合には, 底泥は底面の影響を受けるために波動運動を生じない。底泥に作用する力は底泥表面のせん断応力だけとなる。実験2, 3の結果を比較することにより, 波の場での巻き上げ限界を決定する要因について調べる。

b) SS 濃度の測定

流れの実験では流速を, 波の実験では波高を30分から1時間間隔で増加させ, 懸濁水をサイフォンで採取し SS 濃度を測定した。流れのケースでは懸濁水が迴流装置を循環している間に濃度は一樣になることから, 水路上流端の底面から 5 cm の地点での濃度を測定した。波のケースでは底泥層中央の底面から 1 cm の地点での濃度を測定した。通常波による巻き上げ実験では, 濃度分布を測定するために鉛直方向の数点で懸濁水を採取する。しかし, 本研究では巻き上げ限界について調べるので, 底面付近の濃度を測定するだけで十分であると考えた。

c) 底面せん断応力の測定

底面に作用するせん断応力は, 水路中央部を固定床とし, レーザードップラー流速計により流速分布を測定して, 対数則を用いて求めた。

2.2 実験結果

a) SS 濃度及び巻き上げ率の変化

図-2 (a)~(c) は実験1~3の主なケースでの底泥の SS 濃度 (mg/l) の時間変化である。図-3 (a)~(c) は 図-2 から求めた巻き上げ率 E (mg/cm²/min)

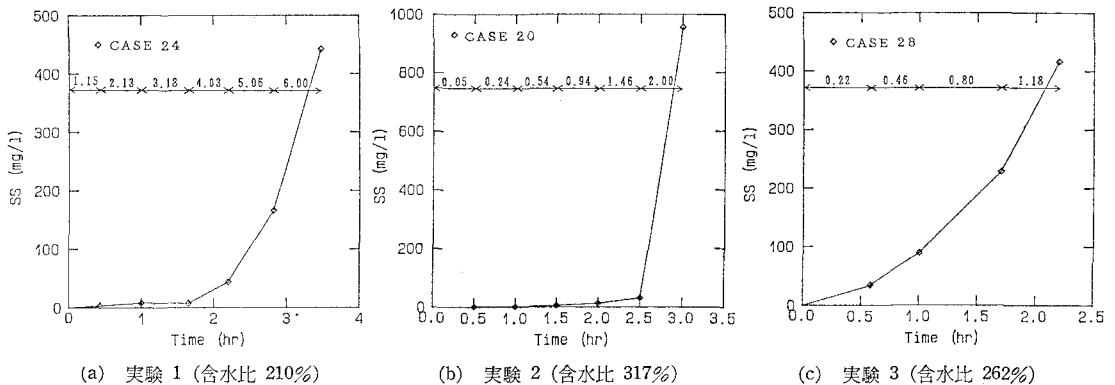
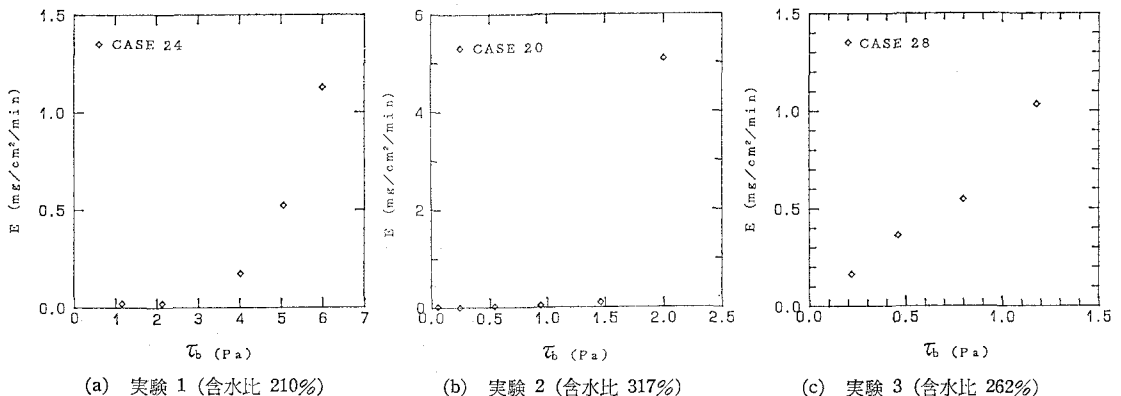


図-2 SS 濃度の時間変化

図-3 巻き上げ率 E と底面せん断応力 τ_b

と底面せん断応力 τ_b (Pa) の関係である。

E は次式から求めた。

$$E = \frac{d(SS)}{dt} \cdot \frac{Q}{A} \dots\dots\dots (1)$$

ここで Q は懸濁水の総量(l)、 A は底泥の表面積(cm^2)である。

巻き上げ限界 τ_c は、通常 図-3 で回帰直線が τ_b 軸と交わる点でのせん断応力の値としているが、本研究では τ_c にある範囲を持たせて表した。

実験 1 および実験 2 では、 τ_b が τ_c を越えると、底泥は急激に巻き上がることがわかる。一方実験 3 では、巻き上げ率は底面せん断応力の増加とともに直線的または放物線的に増えており、 τ_c は非常に小さいと考えられる。

b) 巻き上げ時の底泥

各実験では、以下の現象が観察された。

〔実験 1〕

底面せん断応力 τ_b が τ_c よりも小さい場合、底泥表面には流れにより細かい穴が生じ、小さい粒子が巻き上がる。 τ_b が τ_c を越えると底泥の表面には亀裂が発生し、底泥表面から剥がれるような巻き上げが生じた。この巻き上げの様子は、1 で述べた Kamphuis (1983) や大坪 (1984) の観察結果と一致する。

〔実験 2〕

流れによる巻き上げ (実験 1) と同様に、 τ_b が小さいときは底泥表面に小さい穴が生じ、細かい粒子の巻き上げが起こった。また急激な巻き上げを生じないケースでは、実験終了後の底泥表面に、波の進行方向と平行に底泥表面を竹箒で掃いたようないくつもの筋が観察された。一方、急激な巻き上げが生じたときには、底泥は左右に運動し表面には亀裂が生じた。

〔実験 3〕

底泥は、1 cm から 3 cm 程度の小さい波高で波動運動し始め、同時に底泥表面には亀裂が生じた。巻き上げの初期段階では、底泥は少しずつ巻き上げられ底泥表面付近にもや状の浮遊層が形成された。波高が大きくなり底泥の波動運動が大きくなると、底泥表面の粘土は周期的に上方に激しく巻き上げられた。

3. 巻き上げ限界

3.1 流れの場合の巻き上げ限界

a) 降伏値と限界せん断応力

前述の観察結果から、底泥表面に一樣流が作用する場合 (実験 1) および波による振動流のみが作用する場合 (実験 2)、剥がれるような巻き上げは、底泥に発生する亀裂や底泥表面の振動のような底泥の破壊現象と結び付いていることがわかった。底泥の破壊は、底泥に作用

する外力が底泥の強度を越えたときに生じる。底泥の強度が底泥のレオロジー定数である降伏値と結び付けられることを鶴谷ら (1989) が報告した。そこで、降伏値 τ_y と限界せん断応力 τ_c の比較を行った。

図-4 は、実験 1 での τ_y と τ_c の関係である。ばらつきはあるが、両者はほぼ等しいと考えられる。これは、底泥が巻き上がるときに表面が破壊するという観察結果と一致している。また大坪 (1984) が得た結果を支持するものである。

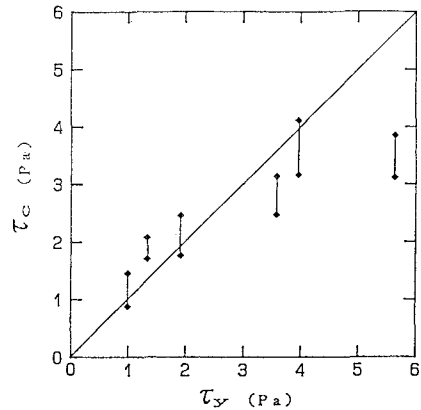


図-4 降伏値 τ_y と限界せん断応力 τ_c (実験 1)

図-5 は、実験 2 での τ_y と τ_c の関係である。図中の点線は本実験水路で発生させることのできる最大底面せん断応力である。また、矢印は巻き上げが生じなかったケースである。流れの場合と同様に、降伏値と限界せん断応力はほぼ一致している。波の場合でも、底泥に作用する力が底面せん断応力のみの場合には、 τ_c は τ_y に等しくなる。

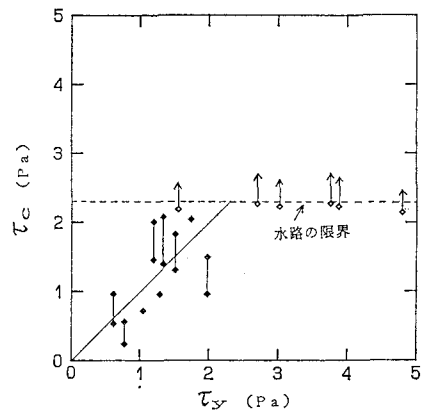


図-5 降伏値 τ_y と限界せん断応力 τ_c (実験 2)

b) 限界せん断応力の定義

図-4, 5 より、底泥表面にせん断応力のみ作用する

場合の巻き上げ限界は降伏値と等しい。これは、降伏値になると底泥の破壊により底泥は巻き上げられやすい状態になるからと解釈できる。そこで限界せん断応力 τ_c を、「底泥内のせん断応力が降伏値になったときに、底泥表面に作用している底面せん断応力」と定義する。

3.2 波動場での巻き上げ限界

a) 底泥の波動運動と降伏値

実験3のように底泥層がある程度の厚さを持つ場合、底泥は波動運動する。この波動運動は底泥に波が作用したときに生じる水平方向および鉛直方向の圧力勾配 $\partial p / \partial x$, $\partial p / \partial z$ によって生じる。圧力勾配が底泥の流動に対する抵抗力、つまり降伏値よりも大きくなると底泥は波動運動し始める。ここで前述の定義を用いれば、波動場での限界せん断応力 τ_c は、底泥が波動運動し始めたときに底泥表面に作用している底面せん断応力となる。実験3の結果を用いると τ_c は 0.03~0.06 となり、 τ_y と τ_c の比は 10~100 のオーダーとなる。これは1のオーダーとなる流れの場での巻き上げとは大きく異なっている。

四建(1987)および楠田ら(1989)は熊本現地泥およびカオリナイトを用いて波による限界せん断応力を調べた。その実験結果を用いて τ_y と τ_c を比較し表-2にまとめた。ここで熊本現地泥、カオリナイトの降伏値 τ_y は、当研究室の回転粘度計で調べた値である。本研究と同様に τ_y と τ_c の比は 10~100 のオーダーである。

表-2 波による限界せん断応力 τ_c と降伏値 τ_y

	粘土	含水比 (%)	限界せん断応力 τ_c (Pa)	降伏値 τ_y (Pa)	τ_y/τ_c
四建(1987)	熊本泥	160~170	0.03	1.4~2.1	47~70
楠田ら(1988)	カオリナイト	100	0.3	46.5	154
楠田ら(1989)	熊本泥(攪乱)	110	0.1	26.8	268

b) 流れによる限界せん断応力と波による限界せん断応力の相違

このように流れによる τ_c と波による τ_c が大きく異なる理由は、次のように考えられる。

底泥内のせん断応力が降伏値に達すると底泥は破壊し、巻き上げ状態になる。流れの場では底泥表面に作用するせん断応力によって底泥は破壊する。一方、波の場では底泥表面に作用するせん断応力が小さくても、圧力勾配によって底泥は破壊し、底泥は巻き上げ状態になる。したがって、波によるせん断応力は流れの場合と比べてかなり小さくなるのである。

c) $\tau_b \sim E$ 曲線の解釈

底泥の巻き上げ率はせん断応力に依存する。流れの場では、底泥が巻き上げ状態になったときに、底泥表面に

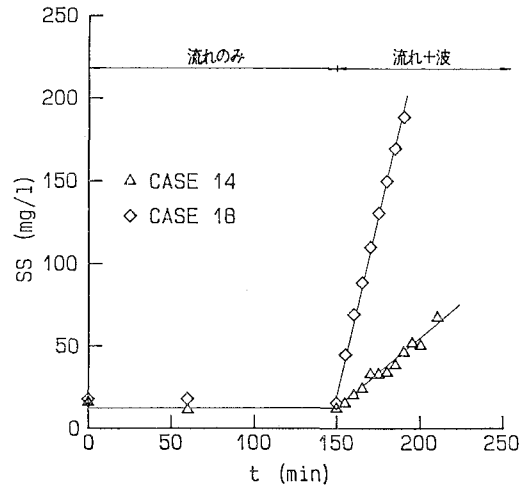


図-6 流と波の共存場での実験結果

作用しているせん断応力は降伏値とほぼ同じ大きさであるため、図-3(a), (b)のように $\tau_b \sim E$ 曲線は急に立ち上がる。一方波の場では、底面せん断応力が小さいときに巻き上げ状態となるために急激な巻き上げとはならず、図-3(c)のように原点付近を通る直線または放物線となる。

d) 流れと波の共存場での巻き上げ実験

鶴谷ら(1988)は、底泥としてカオリナイト(含水比は約200%)を用い、流れと波の共存場での底泥の巻き上げ実験を行った。底泥の厚さを10cm、水深20cmとして実験を行った結果、図-6のように流れだけでは巻き上がらなくても波を作用させることにより巻き上げが生じた。これは流れだけでは底泥内のせん断応力は降伏値に達しなかったが、波を作用させることにより底泥内部のせん断応力が降伏値以上となり巻き上げを生じたものである。

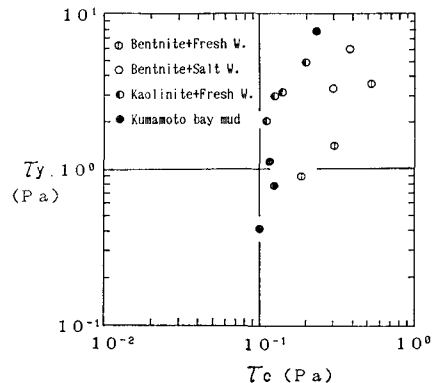


図-7 円形タンクでの実験結果

3.3 円形タンク実験との整合性

円形タンクを用いた村上ら (1989) の実験では、図-7 のように限界せん断応力 τ_c は τ_y よりもかなり小さく、流れの場での限界せん断応力の定義である $\tau_c = \tau_y$ とはなっていない。この理由については次のように考えられる。

円形タンクでは、タンクの回転によって粘土に遠心力が作用する。これに抵抗する力は粘土内部のせん断応力と圧力勾配による力である。粘土内部に微小エレメントを考えた場合、この力関係は (2) 式で表される。

$$\rho \frac{V^2}{r} dz dr = \frac{\partial p}{\partial r} dr dz - \frac{\partial \tau}{\partial z} dz dr \dots\dots\dots (2)$$

ここで p は次式で表される。

$$p = k \rho' g z \dots\dots\dots (3)$$

ρ' は粘土の水中重量、 k は定数である。 k については、鶴谷ら (1989) のスランプ試験の項で詳しく説明している。(3) 式を (2) 式に代入すると

$$\rho \frac{V^2}{r} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \dots\dots\dots (4)$$

これより (5) 式を得る。

$$\tau = -\rho \frac{V^2}{r} z \dots\dots\dots (5)$$

τ は泥層の底の部分で最大となる。これが降伏値よりも大きくなると ($\tau_{\max} > \tau_y$) 粘土は外側に流動する。その結果、泥層は外側が厚く内側が薄くなり圧力勾配 $\partial p / \partial r$ が生じる。この圧力勾配による力は円形タンクの内側に向かって作用し、遠心力、慣性力と釣り合う。このような力学関係により底泥表面付近の粘土も流動しているならば、底泥は巻き上げ状態となり、流れによる底面せん断応力が降伏値程度とならなくても底泥は巻き上がる。したがって、円形タンクでの巻き上げ限界せん断応力は、降伏値よりも小さくなることがあり得る。

このように 3.1 b) で行った限界せん断応力の定義を用いれば、波が存在する場でや円形タンクのように底泥に表面せん断応力以外の外力が作用する場での巻き上げ限界を説明することができる。

4. 結 論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

(1) 実験 1, 2 について、限界せん断応力と降伏値の関係を調べた結果、両者はほぼ等しかった。これは巻き上げ時の底泥表面の観察結果と一致する。

(2) (1) の結果から、底泥は内部のせん断応力が降伏値になったときに巻き上げ状態になると考え、巻き上げ限界を「底泥内部のせん断応力が降伏値になった時に、底泥表面に作用しているせん断応力」と定義した。

(3) (2) の定義にもとづけば、実験 3 での限界せん断応力は降伏値よりもかなり小さくなり、既往の研究で報告されている「波の場での限界せん断応力 τ_c は流れの場での τ_c よりもかなり小さい」ことを説明できる。

(4) 流れと波の共存場、または円形タンクでの限界せん断応力が降伏値よりも小さくなる理由も (2) の定義によって説明できる。

参 考 文 献

- 海田輝之・楠田哲也・二渡 了・栗谷陽一 (1988): 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.
- 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所 (1987): 未発表資料
- 大坪国順 (1984): 底泥の再浮上機構に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 138 p.
- 楠田哲也・山西博幸・川添正寿・二渡 了 (1988): 波による底泥の浮遊及び挙動に関する研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 352~356.
- 楠田哲也・山西博幸・吉見博之・二渡 了 (1989): 攪乱・不攪乱底泥の巻き上げに関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 314~318.
- 鶴谷広一・江口秀二・鷹浜 潤 (1988): 流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 357~361.
- 鶴谷広一・江口秀二・鷹浜 潤 (1989): ベーン試験とスランプ試験による軟らかい粘土の流動限界の検討—一回転粘度計との比較—, 港湾技研資料 No. 655, 21 p.
- 村上和男・菅沼史典・佐々木 均 (1989): 円形回転水路による底泥の巻き上がりと沈降に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 28 巻, 第 1 号, pp. 43~76.
- Kamphuis, J. W., and K. R. Hall (1983): Cohesive material erosion by unidirectional current, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 49~61.
- Partheniades, E. (1965): Erosion and deposition of cohesive soils, Proc. of ASCE, Vol. 91, HY 1, pp. 105~139.
- Thimakorn P. (1980): An experiment on clay suspension under water waves, Proc. of 17th Conf. on Coastal Eng., pp. 2894~2907.