

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 674 June 1990

流れおよび波による底泥の巻き上げ限界

鶴 谷 広 一
江 口 秀 二
佐々木 豊 喜

運輸省港湾技術研究所



Critical Shear Stress for Mud Erosion under Waves or Currents

Hiroichi TSURUYA*

Syuji EGUCHI**

Toyoki SASAKI**

Synopsis

A critical shear stress for mud erosion τ_c is an important parameter of siltation study. Some recent studies have reported that the critical shear stress by waves (τ_{cw}) is much smaller than that by currents (τ_{cc}). The reason for the difference between τ_{cw} and τ_{cc} has not been solved.

In this study, three types of experiments on mud erosion were conducted. The critical shear stress τ_c for currents was investigated in the series of Exp.1 and τ_c by waves in the series of Exp.2 and Exp.3. A depth of mud layer for these experiments is 9 cm, 0.5 cm, and 9 cm, respectively. The depth of mud layer in Exp.2 is so thin that mud layer didn't make a wave action such as that observed in Exp.3. Effects of the mud movement on erosion was investigated. Main results are as follows.

(1) Mud surface fails with cracks or small mud displacements when mass erosion occurs. Since mud failure is related to the yield stress which represents critical stress for mud movement or mud shear strength, τ_c agrees well with τ_y in the series of Exp.1 and Exp.2.

(2) The critical shear stress is defined as the shear stress on the mud surface when the shear stress in the mud surface exceeds τ_y .

(3) According to the above definition, τ_c by waves is smaller because shear stress within the mud exceeds τ_y due to the wave motion.

Key Words : Critical Shear Stress for Erosion, Erosion Rate, Yield Stress, Failure of Mud Bed, Bottom Shear Stress

* Chief of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division
** Member of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

流れおよび波による底泥の巻き上げ限界

鶴谷 広一*
江口 秀二**
佐々木豊喜**

要 旨

底泥の巻き上げ現象を考える上で重要な巻き上げ限界せん断応力 τ_c について検討した。これまで行われてきた研究では、底泥に波が作用した場合の τ_c は、流れが作用した場合の τ_c に比べかなり小さいことが報告されている。本研究ではカオリナイトを用いて、流れによる巻き上げ（実験1）、波による巻き上げⅠ（実験2）、波による巻き上げⅡ（実験3）の三種類の実験を行った。実験2と実験3では、底泥層の厚さを変え、底泥内に作用する圧力勾配が巻き上げに影響するかどうかを調べた。主な結論は次のとおりである。

1) 底泥に流れが作用した実験1の場合と、底泥が波動運動しない実験2の場合、底泥表面が破壊すると急激な巻き上げを生じる。これより τ_c は底泥の強度を表す降伏値 τ_y と関係付けられ、両者はほぼ一致する。

2) 上の結果より、底泥の巻き上げ限界に関わるせん断応力を「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せん断応力」と定義することができる。

3) この定義に基づけば、波による巻き上げ（実験3）での τ_c が実験1での τ_c よりもはるかに小さくなることを説明できる。また、流れと波の共存場や円形タンクでの τ_c についても説明できる。

キーワード：巻き上げ限界せん断応力，巻き上げ率，降伏値，底泥の破壊，底面せん断応力

1. 序

1.1 まえがき

シルテーション（航路や泊地の埋没）は、海底に堆積したシルトや泥（底泥と呼んでいる）の輸送によって生じる。底泥の輸送形態は、重力や質量輸送による底泥層の流動と、波や流れによる底泥の巻き上げとに分けられる。この底泥の輸送量を定量的に予測するためには、底泥運動の鉛直分布や巻き上げられた底泥の濃度分布を知る必要がある。

開水路を用いたシルテーションの研究では、流動限界や巻き上げ限界、および流動速度や巻き上げ率（単位時間、単位面積当りからの巻き上げ量）が調べられている。しかし開水路実験で得られる結果は、水路の持つ境

界条件の影響を強く受けるという問題点がある。例えば質量輸送の実験では、底泥の移動が閉じた領域で起きるために底泥層に勾配が生じることを避けられない。また巻き上げ実験では、注意して実験を行わないと粘土層両端部からの巻き上げが支配的となってしまう。また、巻き上げられた底泥は水路全体に拡散されるため、得られた濃度分布は実際の分布とは大きく異なってしまふ。こうした問題を解消するために用いられる円形タンク実験でも、タンクの回転によって生じる遠心力の影響を除くことはできない。このように質量輸送や巻き上げによる底泥の輸送量を水路実験で調べることは非常に難しい。

一方、底泥の流動および巻き上げに対する抵抗力である流動限界や巻き上げ限界だけならば、実験でもほぼ正確に測定できる。航路埋没の数値計算においても、巻き

* 海洋水理部 水理研究室長
** 海洋水理部 水理研究室

上げ限界は重要なパラメーターであり、その特性を知ることには航路埋没予測の精度を高めるために必要である。流動限界については鶴谷ら(1989, 以後前報と呼ぶ)に詳しくまとめられた。そこで、本研究ではもう一つの抵抗力である巻き上げ限界について検討する。

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、シミュレーションが複雑な現象であると言われる所似である。

巻き上げに対する底泥の抵抗力は、底泥が巻き上がり始めるときの外力 F すなわち限界せん断応力 τ で表される。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。

1.2 底泥の巻き上げ限界に関する既往の研究

(1) 流れの場での巻き上げ限界

1) 二つの巻き上げ限界

流れよる底泥の巻き上げの研究は、1960年代から盛んに行われてきた。この研究の先駆的な役割を果たした Partheniades (1965, 1970) は、サンフランシスコ湾の現地泥を用いて巻き上げの実験を行い、巻き上げが始まる時のせん断応力と、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は無関係であり、後者は底泥の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。彼は、カオリナイト、ベントナイト、モンモリロナイト、霞ヶ浦などの現地泥を用いて底泥の巻き上げを詳細に観察し、底泥粒子が浮上し始める流送限界と、底泥床面が破壊し大量の底泥が短時間に巻き上がる破壊限界の二つの限界せん断応力(彼らは限界掃流力と呼んでいる)を定義した。

2) 限界せん断応力と底泥の特性値との関係

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(中央粒形 $d_{50} = 0.0036$ mm, 塑性指数20~30%, 含水比30

~50%)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)が観察された時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、カオリナイトやモンモリロナイト等の第一底泥グループでは両者はほぼ等しいことを明らかにしている。

この他に、限界せん断応力を塑性指数やベーンせん断強度と比較した結果はASCE(1968)によって報告されている。

(2) 波の場での巻き上げ限界

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、四建下関調設(1987)と楠田ら(1989)が行った、流れの場および波の場での限界せん断応力の比較である。詳しくは3章で述べるが、波の場での限界せん断応力は流れの場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。

1.3 本研究の目的

巻き上げ実験の最終的な目的である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を目的として行うものである。

2. 巻き上げ実験

本研究では次の3種類の巻き上げ実験を行った。

実験1: 流れによる巻き上げ実験

実験2: 波による巻き上げ実験 I

(底泥層の厚さ=0.5 cm)

実験3: 波による巻き上げ実験 II

(底泥層の厚さ=9 cm)

実験2と実験3の違いは、底泥層の厚さである。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、固定床の影響が大きく、底泥内

部の圧力勾配が小さくなるため、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が支配的となる。両者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を調べる。

2.1 実験方法

(1) 実験条件

実験で用いた水路は、図-1に示す長さ11 m、幅0.4 m、高さ0.5 mの二次元造波水路である。波は水路左にあるピストン型造波装置により、流れは水路下部の迴流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。実験は全て水道水を用いて行った。底泥層の長さは2 mである。流れの実験では、水深10 cm、底泥層の厚さは9 cmである。波の実験では、水深30 cm、底泥層の厚さは0.5 cmと9 cm、周期は1.2秒である。流れの実験での最大流速は66 cm/s、波の実験での最大波高は12 cmである。

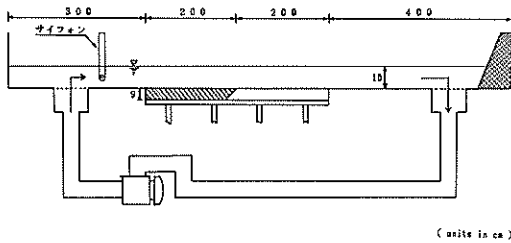


図-1(a) 実験1の説明図

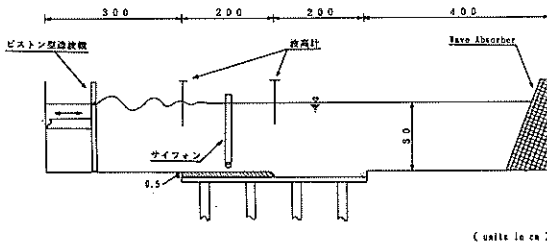


図-1(b) 実験2の説明図

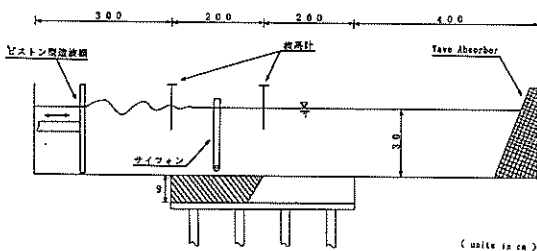


図-1(c) 実験3の説明図

(2) 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様になることから、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ことから、底面付近の濃度を測定するだけで十分である。

(3) 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求めた。測定点は、底面から0.5 mm、1 mm、1.5 mm、2 mm、4 mm、8 mm、15 mm、30 mmの8点である。図-2、3は流れの場および波の場での流速分布の一例である。底面せん断応力 τ_b は対数則により次式から求めた。

$$u(z) = 5.75U_* \log z + C \quad (1)$$

$$\tau_b = \rho U_*^2 \quad (2)$$

これより、流れの場では平均流速 \bar{U} と底面せん断応力 τ_b の関係、波の場では波高 H と底面せん断応力 τ_b の関係を求めた。図-4、5はそれぞれの結果を示す。次の(3)式と(4)式は、得られた底面せん断応力の推定式である。

$$\tau_b = 7.6 \times 10^{-3} \bar{U}^{1.45} \quad (\text{流れの場}) \quad (3)$$

$$\tau_b = 6.0 \times 10^{-3} H^{2.3} \quad (\text{波の場}) \quad (4)$$

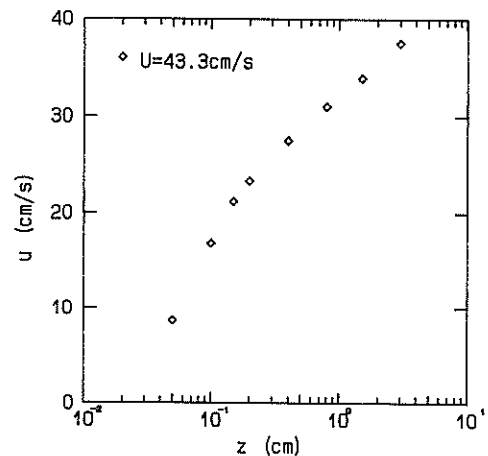


図-2 流れの場での流速分布 (平均流速43.3 cm/s)

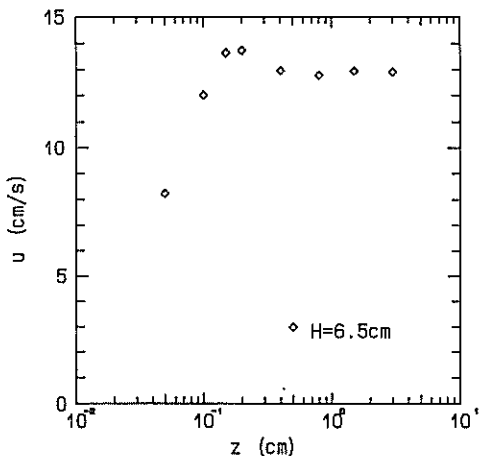


図-3 波の場での流速分布 (波高6.5 cm)

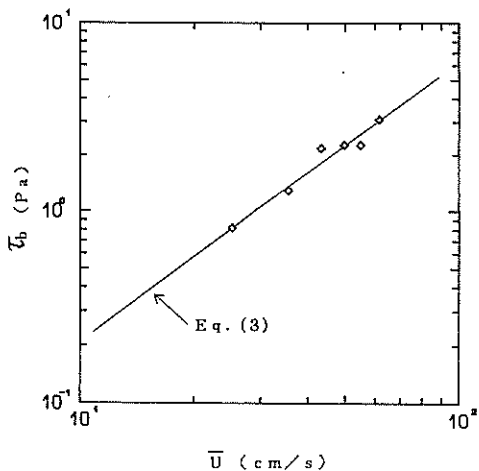


図-4 平均流速 \bar{U} と底面せん断応力 τ_b の関係

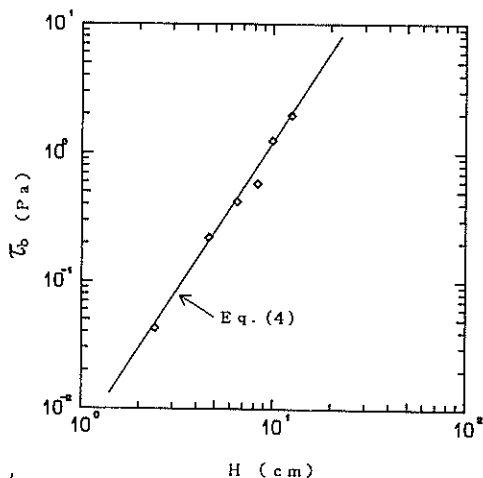


図-5 波高 H と底面せん断応力 τ_b の関係

(4) 限界せん断応力の推定法

巻き上げに関する限界せん断応力 τ_c は、底面せん断応力 τ_b と、巻き上げ率 E との関係図で回帰直線または曲線が τ_c 軸と交わった点のせん断応力の値とする場合が多い。本研究では τ_c をこのような一つの値とせず、限界せん断応力が存在する範囲で表した。

2.2 実験結果

(1) 実験1：流れによる巻き上げ実験

図-6, 7は含水比210%および348%の底泥のSS濃度 (mg/l) の時間変化である。図中の数字はその時間内で作用させた底面せん断応力 (Pa) である。図-8, 9は図-6, 7から求めた巻き上げ率 E (mg/cm²/min) 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。

$$E = \frac{d(SS)}{dt} \cdot \frac{Q}{A} \quad (5)$$

ここで Q は懸濁水の総量 (l), A は底泥の表面積 (cm²) である。含水比210%では τ_b が 4~5 Pa の間で、348%では τ_b が 2~2.5 Pa で巻き上げ率が急激に増加することがわかる。

巻き上げの形態は次のようになった。 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写真-1に見られるような亀裂が発生し、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、1.2で述べた Kamphuis (1983) や大坪 (1984) の観察結果と一致する。

(2) 実験2：波による巻き上げ I

図-10は含水比が317%、底泥層の厚さが0.5 cm の場合のSS濃度の時間変化である。図-11は巻き上げ率 E と底面せん断応力 τ_b の関係である。これより τ_c は 1.5 Pa~2 Pa とした。

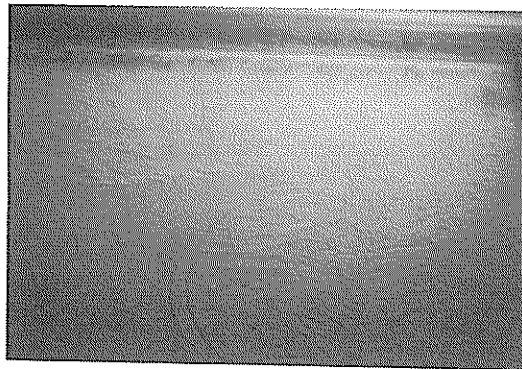


写真-1 表面の亀裂 (実験1)

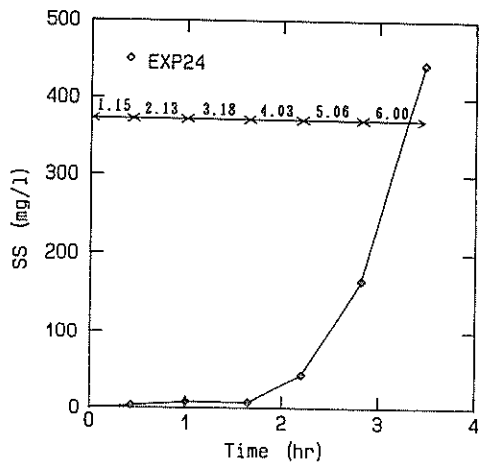


図-6 SS濃度の時間変化 (実験1: 含水比210%)

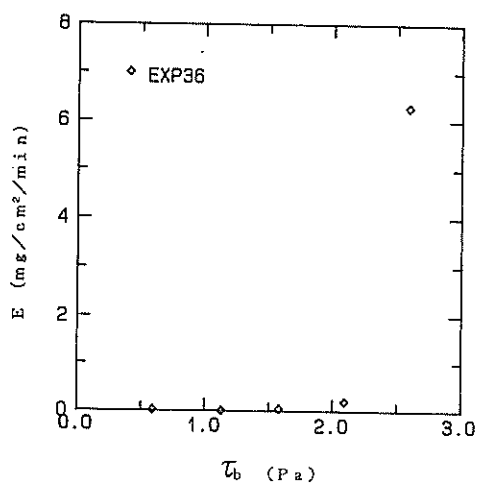


図-9 巻き上げ率 E と底面せん断応力 τ_b
(実験1: 含水比348%)

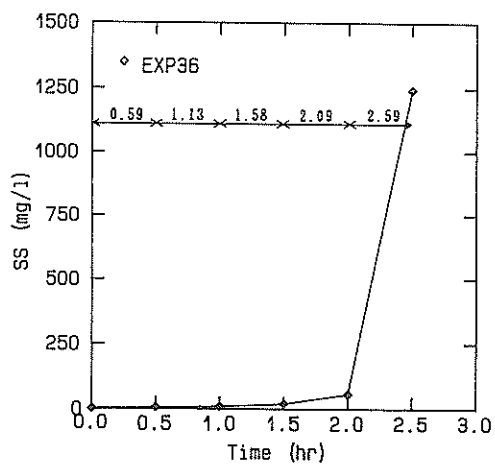


図-7 SS濃度の時間変化 (実験1: 含水比348%)

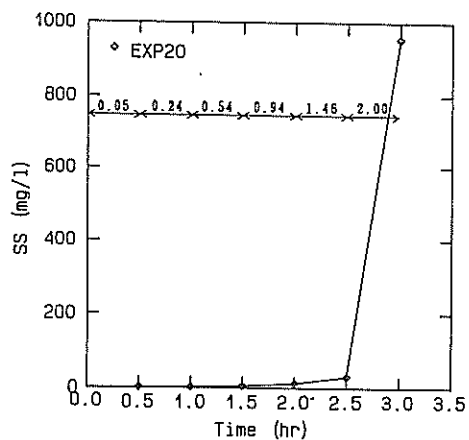


図-10 SS濃度の時間変化 (実験2: 含水比317%)

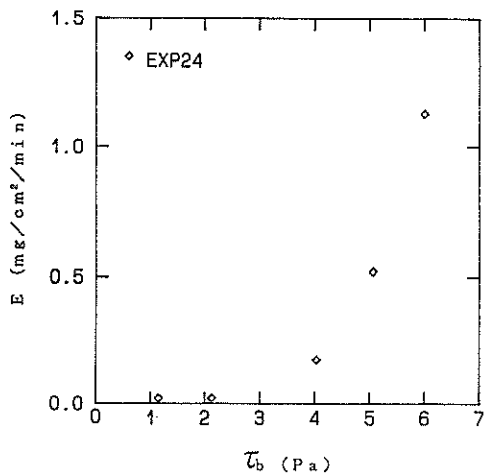


図-8 巻き上げ率 E と底面せん断応力 τ_b
(実験1: 含水比210%)

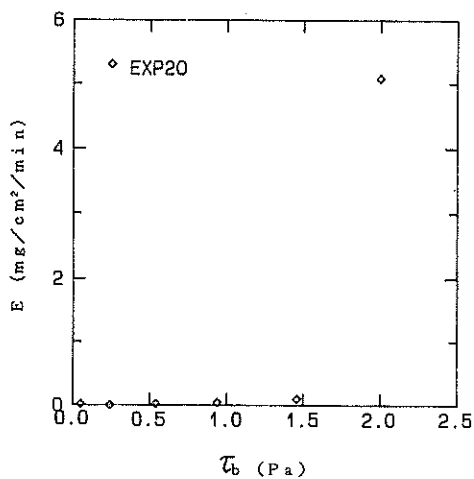


図-11 巻き上げ率 E と底面せん断応力 τ_b
(実験2: 含水比317%)

含水比が270%より小さい底泥では、本実験水路での最大波高(12 cm)に対応する最大せん断応力(約2.2 Pa)では急激な巻き上げを生じなかった。

流れによる巻き上げ(実験1)と同様に、底面流速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写真-2に示すように、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。

(3) 実験3：波による巻き上げII

図-12, 13は含水比が148%および262%、底泥層厚が9 cmの場合のSS濃度の時間変化である。図14, 15は巻き上げ率Eと底面せん断応力 τ_b の関係である。実験1および実験2とは異なり、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いる。この図から τ_b は非常に小さいか、または0となる。

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、底泥はわずかず巻き上げられ底泥表面付近にもや状の浮遊層を形成した。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 流れの場での巻き上げ限界

1) 外力と底泥表面の変化

実験1, 2について、巻き上げが生じたときの底泥表面の様子を表-1にまとめた。底泥表面に一様流が作用する場合(実験1)および波による振動流が作用する場

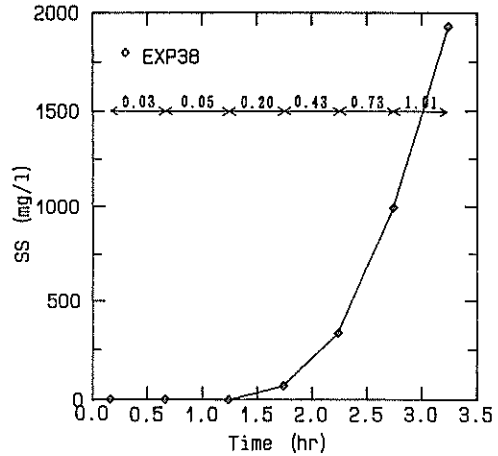


図-12 SS濃度の時間変化(実験3:含水比148%)

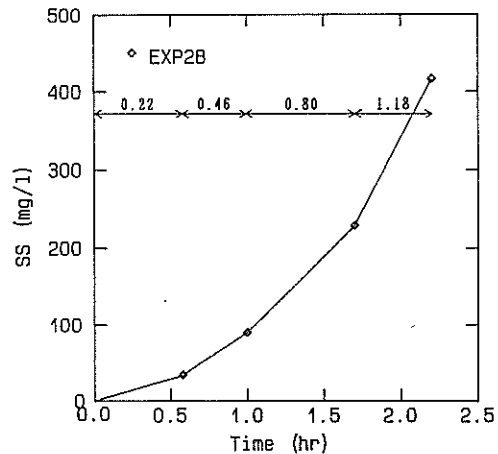


図-13 SS濃度の時間変化(実験3:含水比262%)

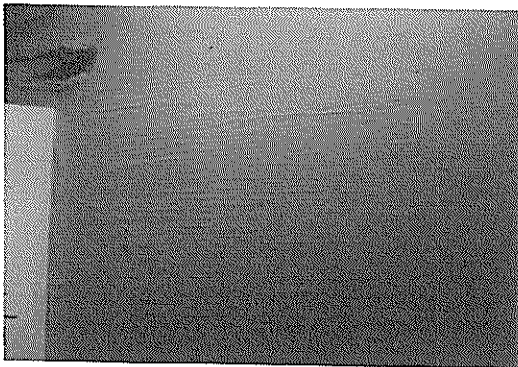


写真-2 表面の縦筋(実験2)

表-1 巻き上げと底泥表面の状態

	実験1	実験2
外力	流れによる一様流	波による振動流
細かい粒子の巻き上げ	・底泥表面に小さい穴 ・流れの方向に筋	・底泥表面に小さい穴 ・流れの方向に筋
剥がれるような巻き上げ	・底泥表面に亀裂	・底泥の振動運動 ・底泥表面に亀裂 ・高濃度の浮遊層が形成される

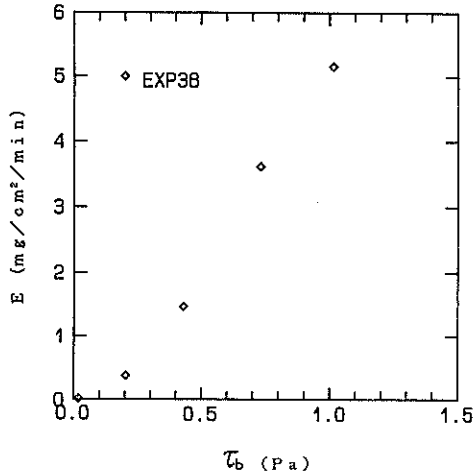


図-14 巻き上げ率 E と底面せん断応力 τ_b
(実験3:含水比148%)

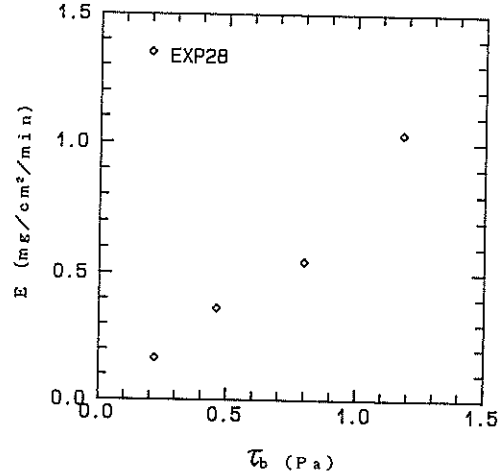


図-15 巻き上げ率 E と底面せん断応力 τ_b
(実験3:含水比262%)

合(実験2), 巻き上げが生じるときの底泥表面の変化には共通点があることがわかる。本研究で対象としている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。

2) 底泥の破壊と降伏値

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前報で報告した。したがって, 底泥の巻き上げ限界は降伏値と関係付けられることが考えられる。

ここで降伏値について説明する。本研究では回転粘度計を用いて降伏値を測定した。回転粘度計については前報および鶴谷ら(1986)に詳しく述べられている。また, 前報では二つの降伏値について述べた。一つは内部の構造が乱された粘土の強度を表す降伏値 τ_{y2} , もう一つは内部構造が回復した粘土の強度を表す降伏値 τ_{y1} である。本研究で行った実験では, 攪はんした粘土を水路に敷き詰めてから外力を作用させるまでに30分から1時間程度経過する。したがって, 攪はん時に乱された粘土の構造は回復しているものとし, 降伏値としては τ_{y1} を考えた。通常回転粘度計で測定されるのは τ_{y2} である。図-16は含水比と降伏値 τ_{y2} の関係である。この図より含水比 W と降伏値 τ_{y2} の関係は次式で表される。

$$\tau_{y2} = 1.611 \times 10^9 W^{-3.77} \quad (6)$$

カオリナイトの τ_{y1} は τ_{y2} のほぼ2倍であることから,

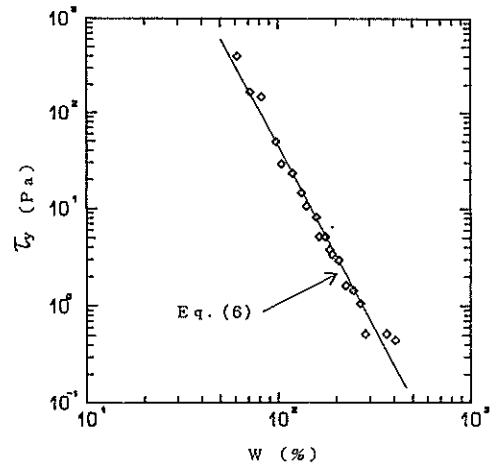


図-16 含水比 W と降伏値 τ_{y2}

(6)式で得られる τ_{y2} を2倍して τ_{y1} を求めた。

(3) 降伏値と巻き上げ限界せん断応力

表-2は実験1での含水比, 降伏値, および限界せん断応力を示す。図-17は降伏値と限界せん断応力の関係を示す。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も一致している。また大坪(1984)が得た結果を支持するものでもある。

表-3は実験2での含水比, 降伏値, および限界せん断応力を示す。図-18は, 降伏値と限界せん断応力の関

表-2 実験1の結果 (流れによる巻き上げ)

実験番号	含水比 (%)	降伏値 τ_y (Pa)	限界せん断応力 τ_c (Pa)
24	210.2	5.64	3.12~3.85
26	237.2	3.58	2.48~3.14
34	231.0	3.96	3.16~4.11
35	280.2	1.92	1.77~2.46
36	347.9	1.34	1.71~2.08
37	436.4	1.00	0.89~1.46

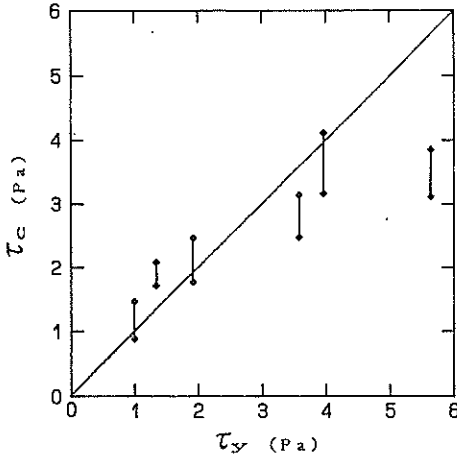


図-17 降伏値 τ_y と限界せん断応力 τ_c (実験1)

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、矢印がついた記号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

表-3 実験2の結果 (波による巻き上げI)

実験番号	含水比 (%)	降伏値 τ_y (Pa)	限界せん断応力 τ_c (Pa)
7	219.5	4.80	2.15以上
8	232.2	3.88	2.23以上
9	243.3	3.02	2.23以上
10	255.6	2.70	2.27以上
11	296.0	1.56	2.19以上
12	297.3	1.52	1.31~1.82
13	308.3	1.34	1.04~2.07
14	202.9	6.46	2.04以上
15	213.4	5.34	2.19以上
16	234.3	3.76	2.27以上
17	277.3	1.98	0.96~1.49
18	273.2	1.05	0.72
19	287.0	1.74	2.04以上
20	317.4	1.20	1.46~2.00
21	358.0	0.78	0.24~0.56
22	376.5	0.62	0.53~0.96
23	258.6	1.29	0.96

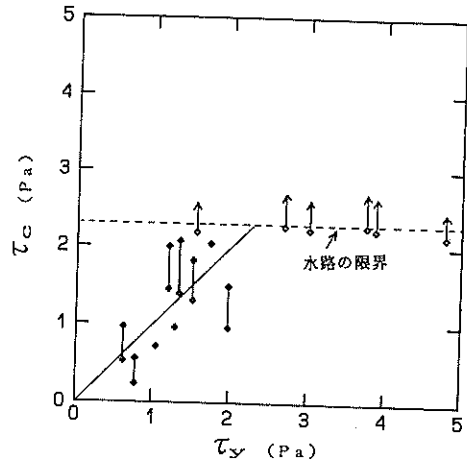


図-18 降伏値 τ_y と限界せん断応力 τ_c (実験2)

る。波の場合でも底泥に作用する力が底面せん断応力の場合には、限界せん断応力は降伏値に等しくなる。

(4) 限界せん断応力の定義

図-17, 18より、底泥表面に流れが作用する場合の巻き上げ限界は降伏値と等しい。これは、底泥表面のせん断応力が降伏値よりも小さいときには底泥は巻き上げられないが、降伏値になると底泥は巻き上げ状態になると解釈できる。そこで限界せん断応力を、「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せん断応力」と定義する。

3.2 波動場での巻き上げ限界

(1) 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 $\partial p / \partial x$, $\partial p / \partial z$ による。圧力勾配に起因する微小エレメントに働く力が底泥の流動に対する降伏値に基づく抵抗力よりも大きくなると底泥は波動運動し始める。前述の定義によれば、波動場での限界せん断応力 τ_{cw} は、底泥が波動運動し始めたときに底泥表面に作用するせん断応力となる。表-4は τ_{cw} と降伏値 τ_y の関係を示す。表中の τ_{cw} の項で以下と書いてあるのは、その実験ケースで最も小さい波高を作用させたときに既に波動運動していた場合である。 τ_y と τ_{cw} の比は、10~100のオーダーであり、1のオーダーである流れの場合での巻き上げとは大きく異なっている。

四建(1983)および楠田ら(1989)は熊本現地泥およ

表-4 実験3の結果(波による巻き上げII)

実験番号	含水比 (%)	降伏値 τ_y (Pa)	限界せん断応力 τ_{cs} (Pa)	τ_y/τ_{cs}
25	205.6	3.07	0.070以下	—
27	243.5	1.63	0.024以下	—
28	261.7	1.24	0.220以下	—
29	186.4	4.45	0.190以下	—
30	202.7	3.24	0.045以下	—
31	222.5	2.28	0.042以下	—
32	248.2	1.51	0.047以下	—
33	308.7	0.66	0.051以下	—
38	147.8	10.70	0.034	315
40	178.9	5.19	0.040	130
41	212.8	2.70	0.059	46

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_{cs} を比較し表-5にまとめた。ここで熊本現地泥の降伏値 τ_y は、当研究室の回転粘度計で調べた値を用いている。本研究と同様に τ_y と τ_{cs} の比は10~100のオーダーである。

このように波の場での限界せん断応力が非常に小さくなるのは、底面せん断応力が小さくても波により底泥が巻き上げ状態となっているからである。

(3) 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

底泥内のせん断応力が降伏値に達すると底泥は巻き上げ状態になる。流れの場での限界せん断応力と波による限界せん断応力が大きく異なるのは、底泥を巻き上げ状態にする外力が異なるからである。流れの場では底泥表面に作用するせん断応力であり、波の場では底泥内部の圧力勾配である。流れの場では底泥表面に作用するせん断応力が降伏値にならないと底泥は巻き上げ状態にならない。しかし、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が巻き上げ状態になる。したがって、波による巻き上げ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。

(4) $\tau_s \sim E$ 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8, 9, 11のように $\tau_s \sim E$ 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-14, 15のように原点を通る直線または放物線となる。

(5) 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、波と流れ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10 cm, 水深20 cmとして実験を行った結果、図-19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、巻き上げを生じたのである。

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-20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(7)式で表される。

$$\rho \frac{v^2}{r} dzdr = \frac{\partial p}{\partial r} drdz - \frac{\partial \tau}{\partial z} dzdr \quad (7)$$

ここで p は次式で表される。

$$p = k\rho'gz \quad (8)$$

ρ' は粘土の水中重量、 k は定数である。 k については、前報のスランプ試験の項で詳しく説明している。(8)式を(7)式に代入すると

$$\rho \frac{v^2}{r} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (9)$$

これより(10)式を得る。

$$\tau = -\rho \frac{v^2}{r} z \quad (10)$$

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、降伏値より小さくなることあり得る。

このように、3.1(4)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。

表-5 他の研究における τ_{cv} と τ_y の関係

	粘 土	含水比 (%)	限界せん断応力 τ_{cv} (Pa)	降伏値 τ_y (Pa)	τ_y/τ_{cv}
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

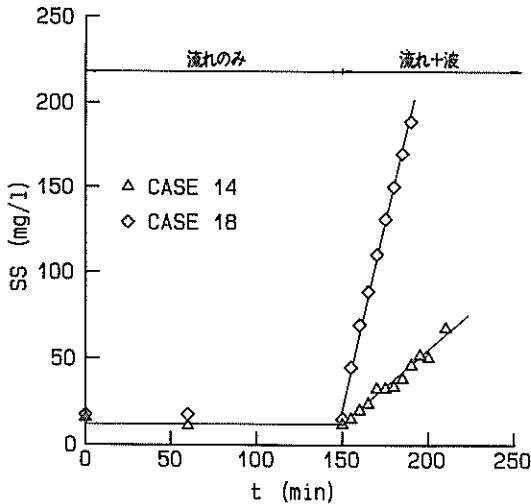


図-19 流れと波の共存場での巻き上げの実験結果

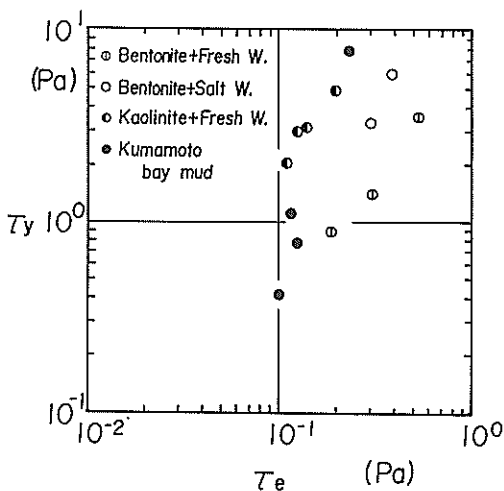


図-20 円形タンクでの実験結果

4. 結論

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

(1) 流れの場での巻き上げ(実験1)では、底面せん断応力が限界せん断応力を越えると底泥は激しく巻き上がった。このとき底泥表面には亀裂が発生していた。

(2) 底泥が薄いときの波による巻き上げ(実験2)では、流れの場合と同様に底面せん断応力が限界せん断応力を越える底泥は急激に巻き上がった。このとき底泥は左右に振動した。

(3) 底泥が厚いときの波による巻き上げ(実験3)では、実験1, 2とは異なり、底面せん断応力が小さい時点から巻き上げが生じ、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加した。また、表面波の波高が小さい時点から底泥は波動運動した。

(4) 実験1, 2について、限界せん断応力と降伏値の関係調べた結果、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。

(5) (4)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ときに、底泥表面に作用しているせん断応力」と定義した。

(6) (5)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。

(7) 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(5)の定義によって説明できる。

5. あとがき

今回行った底泥層の厚さが0.5 cmでの波の実験は、たまたま実験中に水路の底面に落とした粘土が、波によっても動かなかったことにヒントを得て行った。この実験と底泥層が厚い実験を比較することにより、底泥内の圧力勾配が底泥の巻き上げに重要であるかがわかった。鉛直方向に作用する力が巻き上げを考える上で重要

になるのは、底泥の巻き上げに対してだけではない。砂質土からなる底質の巻き上げに対しても、鉛直方向の力は砂粒子を拘束のない状態（液状化）とし、非常に巻き上がりやすい状態を生み出す効果がある。

本研究では、巻き上げ限界を底泥の巻き上がりやすさ（巻き上げ状態）に着目して定義した。

(1990年3月31日受付)

参考文献

- 1) 海田輝之・楠田哲也・二渡 了・粟谷陽一(1988) : 柔らかい底泥の巻き上げ課程に関する研究, 土木学会論文集, 第393号, II-9, 1988年, pp. 33-42.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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, 第36回海岸工学講演会論文集, pp. 314-318.
- 6) 鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤(1986) : 回転粘度計による底泥の流動特性の検討, 港湾技研資料, No. 566, 29 p.
- 7) 鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 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.
- 8) 鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤(1989) : ペ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一, 港湾技研資料 No. 655, 21 p.
- 9) 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, 港湾技術研究報告, 第28巻, 第1号, pp. 43-76.
- 10) ASCE, Report of the Task Committee on Erosion of Cohesive Materials Committee on Sedimentation (1968) : Erosion of cohesive sediments, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 94, No. HY 4, pp. 1017-1049.
- 11) Kamphuis, J. W. and K. R. Hall (1983) : Cohesive material erosion by unidirectional current, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 1, January, pp. 49-61.
- 12) Partheniades, E. (1965) : Erosion and deposition of cohesive soils, *Journal of Hydraulics Division*, ASCE Vol. 91, NO. HY 1, pp. 105-139.
- 13) Partheniades, E. and R. E. Paaswell (1970) : Erodibility of channels with cohesive boundary, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 96, No. HY 3, pp. 755-771.
- 14) Thimakorn P. (1980) : An Experiment on clay suspension under water waves, *Proc. 17-th Conf. Coastal Engineering*, pp. 2894-2907.

港 湾 技 研 資 料 No. 674

1 9 9 0 · 6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
 横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 奥村印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.