

波による底泥の巻き上げ・沈降フラックス

三村 信男*・田 口 智**・加 藤 始***

1. 研究の目的

近年、有明海における熊本新港の建設や東南アジアの港湾における航路・泊地の維持に対する要請を背景にして、シルテーションに関する研究が活発に取り組まれている。シルテーション、即ち底泥の輸送現象は、凝集・沈降・堆積・圧密・泥層中での質量輸送・巻き上げ等の単位過程から成り立っている。従来の研究では、これらの過程個々の現象解明とモデル化が進められたが、充分定量的に評価するには至っていない。本研究は、これらの過程のうち巻き上げと沈降に着目し、波の作用下での巻き上げ・沈降フラックスの定量化へのアプローチを試みたものである。

波の下での巻き上げフラックスを測定した研究はいくつかあるものの(柴山ら, 1987; Maa ら, 1987; 楠田ら, 1988), 全て泥層上の懸濁底泥濃度の時間変化に基づいてフラックスを求めている。本研究ではまず、従来の方法では巻き上げフラックスを過小評価することを明らかにし、正確に求める上で必要となるネットとグロスのフラックスという概念の整理と実験方法の検討を行なった。ついで、観察に基づいて泥層の状態を固定床的、破壊状態、流体層的と分けた上で、各状態における巻き上げフラックスを測定し、底面せん断応力と関係づけた。

一方向流の作用下での底泥の輸送過程については、多くの研究が積み重ねられてきており、とくに、巻き上げ形態 (surface erosion と mass erosion: Partheniades, 1965), 巻き上げ・沈降フラックスの表現式 (Partheniades, 1976; Mehta ら, 1982; 大坪ら, 1986; 海田ら, 1988), 種々の限界せん断応力と底泥のレオロジー特性量との関係 (Migniot, 1968; 大坪ら, 1985) 等について重要な結果が得られている。底泥の輸送過程を定量化する上で重要な点は、これらの諸量と流れとの関係が底面せん断応力によって統一的に表現されていることである。そこで、波による底泥の巻き上げ・沈降に対しても、底面

せん断応力との関係を検討した。さらに、一方向流の下での従来の成果と比較することによって、波の下で生じる現象の特性を明らかにしようとした。

2. 実験の概要

実験には、図-1 に示すような長さ 13m, 幅 0.3m のアクリル製の造波水槽を用いた。この水槽には、中央部に 2m の凹部があり、ここに底泥を入れて泥層を作った。今回の実験では、底泥としてベントナイトを用いた。実験の内容は、底泥層の挙動を観察し、巻き上げフラックスを測定する巻き上げ実験と、沈降フラックスを測定する沈降実験との二つに大別できる。

巻き上げ実験では、水槽中の凹部に所定の含水比に調整したベントナイトを敷きつめ、波を作用させた。底泥床の前後で波高を計測するとともに、造波開始後 40, 80, 120, 200 分毎に、次節で述べる方法で巻き上げられた底泥の量と泥層中の含水比の分布を測定し、これに基づいて各期間における平均巻き上げフラックスを算定した。巻き上げ実験は、泥層の含水比を 250% から 505% の範囲で 16 通り、更に波高・周期・水深を数通りづつ変化させ、合計 26 ケースの実験を行った。

沈降実験では、水槽凹部に床板をおき全体を固定床とした。その上で、水中に均一にベントナイトを懸濁させ波の作用下での沈降量を測定した。初期濃度としては、230, 570, 1150 mg/l の 3 種類とし、各々の初期濃度に対して、波高・周期を変化させ (水深は 30cm で一定)、合計 12 ケースの実験を行った。

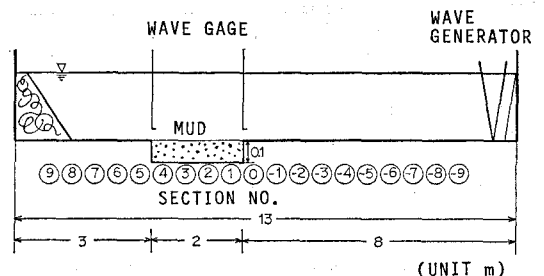


図-1 実験水槽

* 正会員 工博 英城大学助教授 工学部建設工学科

** 英城大学大学院 工学部建設工学科

*** 正会員 工博 英城大学教授 工学部建設工学科

3. 巻き上げ・沈降フラックスとその測定法の再検討

3.1 ネットとグロスの巻き上げフラックス

一方向流あるいは潮流のような長周期の振動流の下での底泥の巻き上げ・沈降に関する研究の重要な結論の一つは、(沈降・堆積が生じる上限の底面せん断応力) < (巻き上げが生じる下限の底面せん断応力) という関係があるということである (Partheniades, 1976; 海田ら, 1981)。すなわち、ある底面せん断応力の下では巻き上げと沈降とが同時には生じず、測定される巻き上げ・沈降フラックスはグロスとネットの量が一致したものである。

しかし、波の下では他の研究 (楠田ら, 1988) と同様、この両者が同時に生じることが観測された。従って、波による巻き上げフラックスは、沈降フラックスを含めたネットの量ということになる。もし底泥の輸送が水平方向には生じず、鉛直カラムの中でのみ生じるとすれば、濃度分布の経時変化を測定することによってネットの巻き上げフラックスを求めることができる。

しかし、水槽の一部に泥層を設けた実験では、波の質量輸送や懸濁粒子の濃度差による密度流効果によって、巻き上がった底泥は水槽全体に輸送されていく。図-2 は、造波開始後 120 分における水槽の各セクション (長さ 0.5 m) の底泥の存在量を示したものである。これを見ると、巻き上げられた底泥の相当量が泥床以外の部分に運ばれたことがわかる。このような状態で泥床上の水の中における濃度分布に基づいて巻き上げフラックスを求めれば、著しい過小評価になるであろう。これを防ぐために水槽全体に底泥を敷き詰めたとしても、波の波高減衰の結果、水槽軸に沿って巻き上げ量が不均一になるため、水平方向に懸濁物質の輸送が生じることにかわりはない。

そこで、本研究では、同一のせん断応力の下で生じる巻き上げ・沈降フラックスのグロスの量を各々測定し、その差をとってネットのフラックスを求めることにした。グロスの巻き上げフラックスは、水槽を 0.5 m のセ

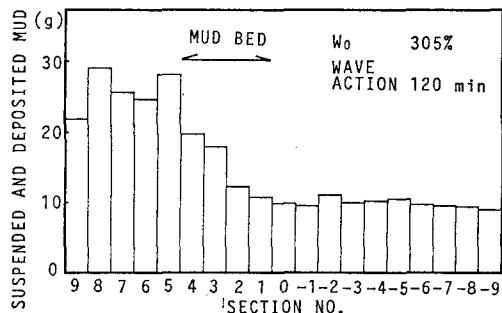


図-2 水槽中の底泥存在量の分布

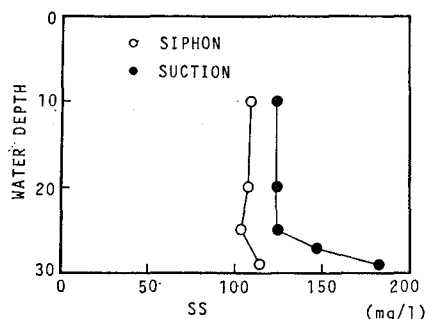


図-3 採水方法による濃度分布の測定結果の違い

クションに分け (図-1 の-9~9), 各セクション毎に懸濁状態にある底泥と固定床部では底面上に沈降・堆積している底泥の総量を測定することによって評価した。沈降フラックスについても、水槽全体の懸濁底泥量の経時変化を測定することによってグロスの量を求めた。

3.2 濃度の測定

今回の方法で求めた巻き上げ・沈降フラックスの精度は濃度の測定に大きく左右される。そのため、まず試料のサンプリング法を検討した。図-3 は、水槽のセクション No. 2 でサイフォンによる吸い出しと水槽側面に穴をあけてサンプリングした試料を比較したものである。これを見ると、サイフォンによるサンプリングでは、全体として濃度が小さく、かつ鉛直分布が均一化される傾向があることがわかる。このため、今回の実験では、泥面付近が密になるよう水槽側面に穴 (内径 3 mm) をあけ、水中と泥層中の試料を採取することにした。

このようにしてサンプリングした試料は、濃度にして $10^3 \sim 10^5$ mg/l に及ぶ広がりをもつ。そのため、各濃度レンジに応じて、濁度計、電導度計、蒸発皿による質量測定 (JIS K 0101 懸濁物質測定法) を使い分けた。

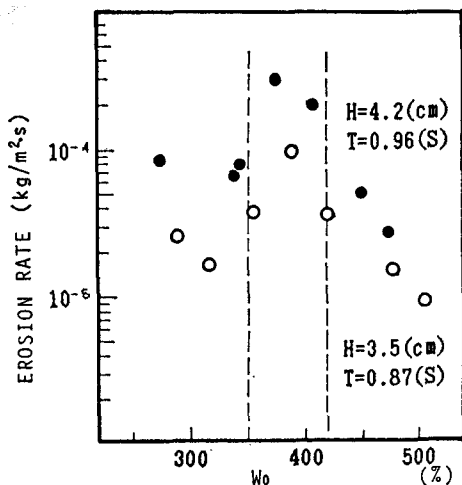
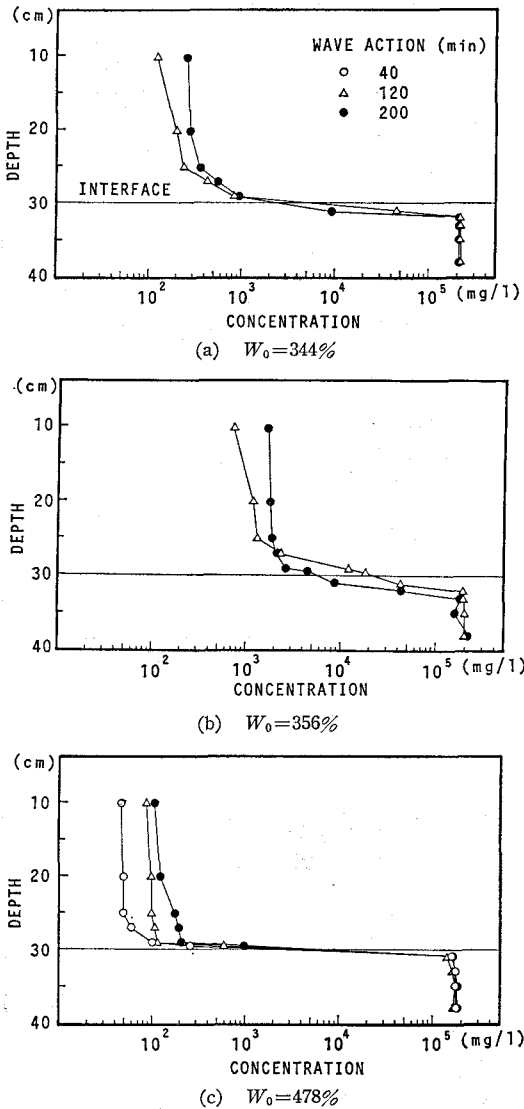


図-4 泥層の初期含水比による巻き上げフラックスの変化



図—5 底泥濃度の鉛直分布

4. 底泥の挙動と巻き上げ形態

実験結果の最初に、含水比の変化に応じた底泥層の挙動と巻き上げ形態の推移について述べる。図—4 は、2種類の波の条件の下で、初期含水比 W_0 によって巻き上げフラックスがどのように変化するかを示したものである。これによると、どちらの条件においても、巻き上げフラックスは $W_0=380\%$ で極大値をもつ特異な分布をしている。この図と実験中の観察から、ベントナイト泥層の挙動は、 $W_0=350\%$ と 420% とで区切られる3つの領域に区別できることがわかった。図—5 は、この3つの領域に対して、水中から泥層中までの底泥濃度の鉛直分布を経時的に測定した結果である。各領域における底泥の挙動は次のようにまとめられる。

a) $W_0 < 350\%$ (固定床領域)

この領域では泥層はほとんど運動を示さず、固定床的であった。ただし、初期含水比が高くなるにつれて泥層表面のごく薄い層に小さな振動が現れた。図—5 (a) は $W_0=344\%$ の底泥濃度の鉛直分布である。これを見ると、界面より 2 cm 以下では濃度 (含水比) は変化していない。一方、界面下 1 cm の点では濃度が時間と共に減少しており、泥層表層では水の浸透が生じていることを示している。この領域で生じる巻き上げは surface erosion, 即ち、個々の粘土粒子や微小な集塊が泥面からはがされていく形態と観察された。しかし、表層の含水比が時間と共に減少していくことからすると、ごく薄い層の mass erosion が生じている可能性もある。

b) $350\% < W_0 < 420\%$ (破壊領域)

この領域では、泥層は 1~2 cm の厚さで激しく破壊され、波の進行に伴って長さ 1~5 cm 程度の板状の泥塊が互いにぶつかり合う状態が出現した。造波時間が長くなると、表層の破壊層は高含水比の流体的な層に変化した。図—5 (b) がこの範囲における濃度の鉛直分布である。図では破壊が急激で界面が急速に低下していることがわかる。底泥は、破壊された泥塊のぶつかり合いによって激しく巻き上げられており、巻き上げ形態は mass erosion と判断された。

c) $W_0 > 420\%$ (流体層領域)

この領域では、底泥層全体が運動する流体的な状態になっており、波の通過に伴って泥層も波動運動を示した。この範囲の濃度分布は図—5 (c) に示されているが、界面下 1 cm からほとんど濃度 (含水比) の変化が生じていない。このときの巻き上げは、波動運動をする界面から静かに泥粒子が巻き上げられていく surface erosion であった。

上に述べたような泥層の挙動と巻き上げ形態の推移は必ずしも明瞭なものではなく、境界の初期含水比付近では、2つの形態が混在するような事も見られた。

5. 巻き上げ・沈降フラックス

5.1 底面せん断応力の評価

1. でも述べた通り、従来一方向流による巻き上げフラックスは流れによる底面せん断応力と関連づけて表現されてきた。本研究でも巻き上げフラックスを波による底面せん断応力の振幅 τ_m に関連づけることを考える。

泥層の挙動は上で述べたように固定床的、破壊、流体的と3つの形態を示すため、単一の方法で底面せん断応力を評価することは難しい。そこで、各領域毎に評価法を分け、固定床領域には、Jonsson (1966) の方法を用いた。一方、流体層領域では、泥層内の含水比が初期含水比からほとんど変化せず鉛直方向に一樣であったという

実測結果に基づいて、Darlymple・Liu(1978)の2層粘性流体モデルを用いて底面せん断応力を計算した。今回の実験条件では、無次元泥層厚 $d/(2\nu_2/\sigma)^{1/2} \sim O(1)$ (d は泥層厚, σ は波の角周波数, ν_2 は泥の動粘性係数) であったため、泥層厚が小さい場合の解を用いた。泥層の粘性係数は、鶴谷ら(1986)の実測結果によった。

泥層の破壊が生じている状態では界面の位置を定義することにも、界面における底面せん断応力 τ_m を評価することにも適当な方法がない。そこで、破壊領域の低含水比側では Jonsson の方法による τ_m を、高含水比側では Darlymple・Liu のモデルによる τ_m を援用した。

5.2 巻き上げフラックス

図-6 は、ガラスの初期巻き上げフラックス F_E (造波時間40分と80分) を底面せん断応力の振幅 τ_m に対してプロットしたものである。図中で点線で囲んだデータは破壊領域のケースのものであり、固定床領域と比べて10倍近く大きな値となっている。

これを除くと、ベントナイトの巻き上げフラックスは固定床的、流体的という2つの泥層の状態に対応して2つに分けられる。両者とも $F_E = A \cdot \tau_m^3$ の線のまわりに分布するが、流体層領域では、初期含水比 W_0 が高くなるにつれてこの線は左にシフトし、最終的にはある線に

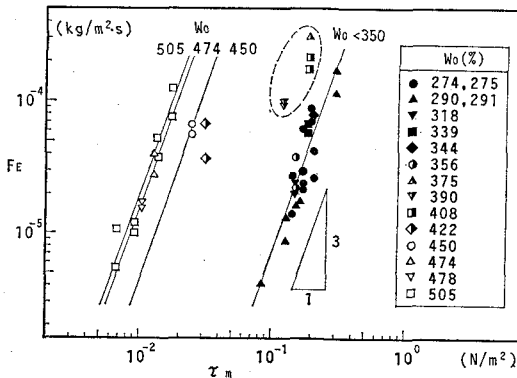


図-6 底面せん断応力とグロスの巻き上げフラックス

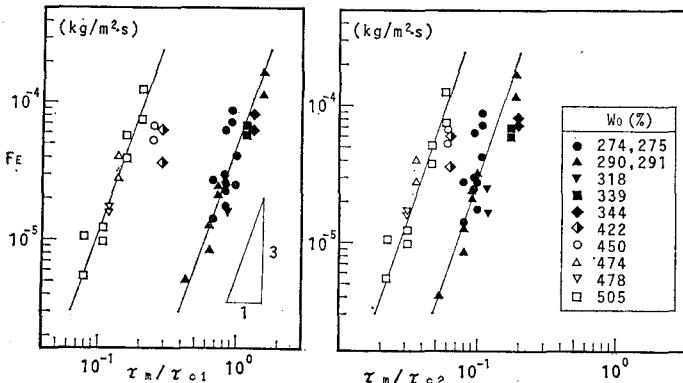


図-7 無次元底面せん断応力とグロスの巻き上げフラックス

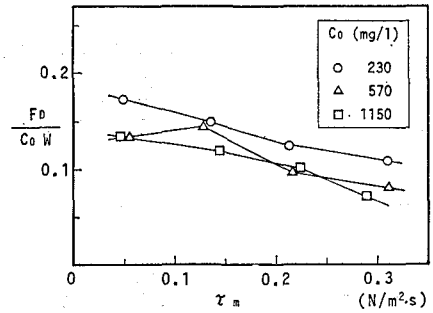


図-8 底面せん断応力とグロスの沈降フラックス

漸近するようにみえる。

従来、一方向流の下での巻き上げフラックスは種々の形で底面せん断応力と関連づけられてきたが、実験的に得られた代表的な形は次の2つである(大坪ら, 1986; 海田ら, 1988)。

$$F_E = A_1 \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$F_E = A_2 \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)^\beta \quad (2)$$

これらの式中で、 τ_c は巻き上げ限界の底面せん断応力である。底泥の巻き上げに対する抵抗力は粒子間の相互作用(粘着力)に由来するが、それが τ_c の形で巻き上げフラックスの表現の中に取り入れられている。

大坪(1985)は、一方向流の下での底泥の巻き上げに対して、巻き上げ限界と破壊限界の2つの限界状態を定義し、それら各々に対する限界せん断応力 τ_{c1} , τ_{c2} が、粘性係数や降伏値といったレオロジー特性量と関連づけられることを示した。

巻き上げ実験において、巻き上げの開始を明瞭に判定することは困難であるし、又、底泥の粘着力を直接測定する事もできない。そこで、ここでは大坪の τ_{c1} , τ_{c2} を泥層の抵抗力の指標とし、それを用いて底面せん断応力の振幅 τ_m を無次元化した。無次元せん断応力と F_E との関係が図-7 である。図をみると、 τ_{c1} で無次元化した場合、固定床領域、流体層領域の2つの

グループ毎によくまとまることがわかる。

それらは、

$$F_E = A_1 \left(\frac{\tau}{\tau_{c1}} \right)^\alpha \quad (3)$$

と表せ、 A_1 ($\text{Kg/m}^2\text{s}$) は各々 1.1×10^{-2} と 3.5×10^{-5} , $\alpha=3$ である。

この結果からすれば、波の作用下では、固定床領域においては、一方向流の巻き上げ限界をはさんでそれ以下でも巻き上げが生じ、流体層領域ではその更に $1/10$ の底面せん断応力でも巻き上げが生じていることになる。

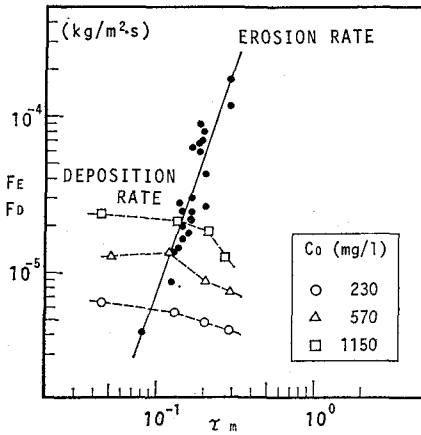


図-9 底面せん断応力と巻き上げ・沈降フラックス

5.3 沈降フラックス

図-8 は、グロスの初期沈降フラックス F_D (造波時間 40分) と Jonsson の方法による底面せん断応力の振幅 τ_m との関係を示したものである。図中で F_D は、初期濃度 C_0 とベントナイトの単粒子沈降速度 w によって無次元化されている。

この図から、沈降フラックスは波の作用下においても底面せん断応力の増大に応じて減少することがわかる。これは、一方向流と同様、界面近傍の境界層中における強いシアのため一部の粒子は着底できず、水中に再びはね返されるためであろう。底面せん断応力が更に大きくなるとやがて $F_D=0$ となる限界状態が現れると考えられるが、今回の造波条件の下では生じなかった。

沈降フラックスと底面せん断応力との関係は、今回の実験の範囲では、

$$\frac{F_D}{C_0 w} = B \tau_m^{0.25} \dots\dots\dots (4)$$

と与えられるが、この関係を確定するためには更に広範囲な条件で実験結果を蓄積する必要がある。

5.4 ネットの巻き上げ・沈降フラックス

以上のように、巻き上げと沈降各々のグロスのフラックスが求められた。固定床の場合に対して、その2つを重ねたのが図-9である。図にみられるように、巻き上げフラックスと沈降フラックスとは、ある底面せん断応力の点で交差する。グロスの巻き上げと沈降フラックスの大小関係から、この点をはさんで巻き上げ、沈降のいずれが卓越するかが判定され、更に、両者の差をとることによってネットのフラックスが評価できる。

泥層が流体的になった場合、界面周辺に発達する境界層の構造も異なるものと考えられる。従って、今回のように固定床の下で得られた沈降フラックスを流体層領域の泥層の巻き上げフラックスと組み合わせることはできない。

6. 結 語

本研究においては、波の作用下では巻き上げと沈降とが同時に生じるという実験事実から出発して、波による巻き上げ・沈降フラックスを測定する方法を示した。それに基づいて測定されたグロスの巻き上げ・沈降フラックスが、泥層の状態を考慮して適切に評価すれば底面せん断応力とよく関連づけられることを示した。しかし、一方向流の下での現象との量的差は大きく、これを埋めるためには、波による底泥の巻き上げの力学的機構に対する理解、波による底面せん断応力の評価法について更に研究を進める必要がある。

最後に、今回の研究の過程で、熱心に実験に協力して下さった小山勝也君、古川英希君 (当時茨城大学学生) に深甚な謝意を表する。

参 考 文 献

- 海田輝之・楠田哲也・栗谷陽一・即松秀晴 (1981): 底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究, 第17回衛生工学研究討論会講演論文集, pp. 42~50.
- 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, 土木学会論文報告集, 第393号/II-9, pp. 33~42.
- 大坪国順・村岡浩嗣 (1985): 底泥の物性及び限界せん断応力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第363号/II-4, pp. 225~234.
- 大坪国順・村岡浩嗣 (1986): 流れによる底泥の飛び出し率, 土木学会論文報告集, 第375号/II-6, pp. 43~52.
- 楠田哲也・山西博幸・川浅正寿・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.
- 柴山知也・中西雅明・石原肇・佐藤慎司 (1987): 波による底泥の浮遊機構に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 271~275.
- 鶴谷広一・中野晋・廣沢潤 (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. 556, 29 p.
- Dalrymple, A. R. and P. L. F. Liu (1978): Waves over soft muds: a two-layer fluid model, J. Physical Oceanography, Vol. 8, pp. 1121~1131.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Coastal Eng. Conf. ASCE, pp. 127~148.
- Maa, P.-Y. and A. J. Mehta (1987): Mud erosion by waves: a laboratory study, Continental Shelf Research, Vol. 7, Nos. 11/12, pp. 1269~1284.
- Mehta, A. J., T. M. Parchure, I. G. Dixit and R. Ariathurai (1982): Resuspension potential of deposited cohesive sediment beds, Estuarine Comparisons, Academic Press, pp. 591~609.
- Migniot, C. (1968): A study of the physical properties of various forms of very fine sediment and their behavior under hydrodynamic action, La Houille Blanche, No. 7, pp. 591~620.
- Partheniades, E. P. (1965): Erosion and deposition of cohesive soils, Proc. ASCE, Vol. 91, No. HY1, pp. 105~139.
- Partheniades, E. P. (1976): Unified view of wash load and bed material load, Proc. ASCE, Vol. 103, No. HY9, pp. 1037~1057.