

流れと波による底泥の巻き上げ現象

小蔵 紘一郎*・口 田 登**・足 立 一 美***・楠 田 哲 也****

1. ま え が き

粘土、シルトのような軟弱な底泥が広範囲に堆積している海域においては、潮流や波浪によって容易に底質が巻き上げられ、海域が静穏になると沈降し、港湾の航路や泊地の埋没の原因となる。

このように微細な粒子が沈降し海底に堆積する現象はシルテーションとして知られているが、微細粒子は粒子間の物理化学的な力の作用によって比較的粒径の大きい砂とは異なった挙動を示し、その取扱いが困難なこともあって我が国における技術的な蓄積が遅れている課題である。そのために軟弱土海域における港湾の建設と維持に際し、航路・泊地の埋没量の予測と埋没対策の策定に当って大きなネックとなっている。

本報では、このような現状を踏まえ、流れと波による底泥の巻き上げ現象を解明することを目的として有明海の潟の中に立地する熊本港において荒天時の海水中の浮遊底泥の濃度の現地観測を行うとともに、巻き上げの外力となる流れと波をそれぞれ単独に作用させた室内実験を行い、いくらかの知見が得られたので初報として報告する。

2. 底泥の堆積状況と物理的性質

図-1 に熊本港の海底表層の土質分布状況を示す。この図でわかるように、水深 L.W.L. -1m 以深にはシルト又は粘土質シルトが広い範囲にわたって堆積している。図中のメッシュは 1 km 毎にひいてある。A点での鉛直方向の堆積厚をみると表層から 80 cm 以上の厚さに中央粒径 0.002 mm 程度の微細粒子の層がある。

底泥の定義は確定していないが、本稿では一般の概念にならない粘土・シルト系の混合物、ないしは粘土程度の粒度分布を有するものとして捉えることとする。このような底泥は集合状態になったときに凝集力が作用し、電気的な力や粒子間力により互いに作用を及ぼしあい種々

のイオンを吸着する微粒子の集合体であるとされている。

3. 現地観測

(1) 観測地点及び観測施設

観測地点は図-1 に示す B 点で、水深 -4.1 m の汀線より約 3.5 km 沖合の地点である。観測施設は図-2 に示す波浪・潮位の恒常観測のために設けられた鋼製の観測塔を利用し、これに浮遊底質の濃度を測定するための採水装置を +4 m, +2 m, ±0 m, -2 m, -3 m 及び海底面上 0.3 m (-3.8 m) の 6 箇所に設置した。

また電磁流速計（マーシュ・マクバーニー社製、内部記録式）を図-3 に示すようにして海底面上 0.3 m 及び 2 m の 2 箇所に設置した。この電磁流速計では 2 方向の流速の大きさを測定でき、測定範囲は ±300 cm/sec、測定精度は ±2 cm/sec で内蔵の磁気テープに記録される。

(2) 観測方法

昭和 59 年 12 月～60 年 3 月までの間に 4 回にわたっ

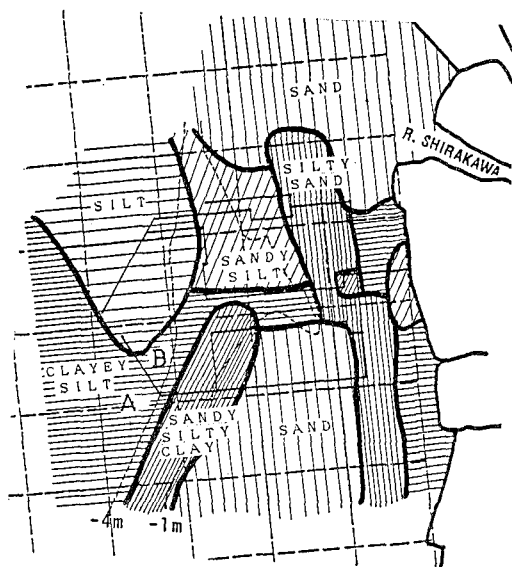


図-1 底泥の堆積状況（平面分布）

* 正会員 運輸省第四港湾建設局 下関調査設計事務所長
 ** 正会員 運輸省第四港湾建設局 下関調査設計事務所次長
 *** 正会員 工修 運輸省第四港湾建設局 下関調査設計事務所調査課長
 **** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科

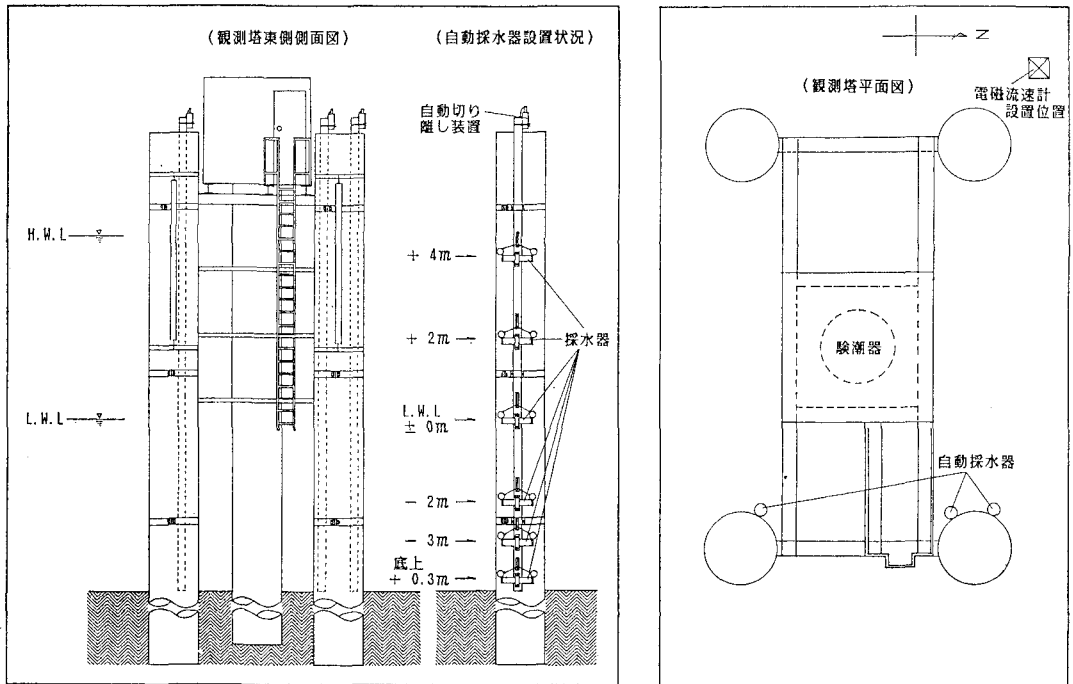


図-2 観測塔にとりつけた採水器と流速計

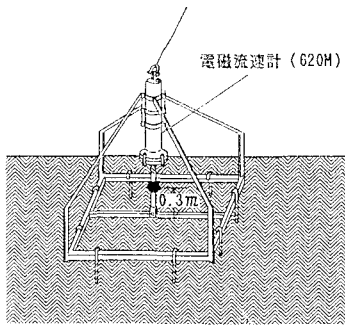


図-3 電磁流速計の設置

て2時間おきに3回自動採水器で採水し、SS濃度を求めた。

また、電磁流速計により各測定回毎に流れを5分おきに3日間連続測定した。5分おきのデータは1秒間隔で128個取得した。

(3) 観測結果

図-4は4回の観測のうち一番大きな波が観測された昭和60年1月28日に海底面上0.3mで観測された流速のN方向成分とE方向成分を示したものである。潮位表によれば当日は小潮で、図-4でも潮流の流速は小さい。

ここで観測された流速は主として潮流と波浪による振

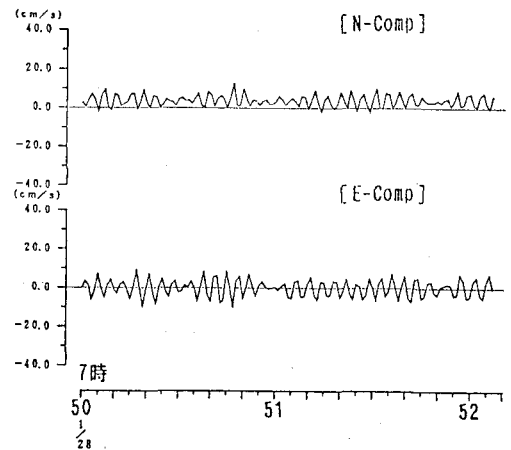


図-4 流速の観測値

動流の合成流であると考えられるので、次のようにして波浪による振動流成分を求めた。

$$\tilde{u}_i = u_i - \bar{u}_i \quad i=1 \sim N \quad \dots \quad (1)$$

ここに、 u_i : N又はE方向の流速の観測値

$\bar{u}_i$: u_i の移動平均値

こうして求めた振動流の流速のN方向成分とE方向成分をそれぞれ、 $\tilde{u}_{Ni}$ 、 $\tilde{u}_{Ei}$ とすれば、振動流の主方向 θ は次式で求められる。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\bar{u}_E \bar{u}_N}{\bar{u}_E^2 - \bar{u}_N^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ここに, } \bar{u}_E^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N=128} \bar{u}_{Ei}^2$$

$$\bar{u}_N^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N=128} \bar{u}_{Ni}^2$$

$$\bar{u}_E \bar{u}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N=128} \bar{u}_{Ei} \bar{u}_{Ni}$$

振動流速の主方向成分 $\bar{v}_i$ は次式で求められる。

$$\bar{v}_i = \bar{u}_{Ei} \sin \theta + \bar{u}_{Ni} \cos \theta \dots\dots\dots (3)$$

図-5 に当日に自動採水器によって観測された浮遊底質の鉛直分布を示す。8時, 10時, 12時に採水した値であり, 潮位は28日6時42分が低潮で +113 cm, 12時56分が高潮で +356 cm となっており, 漲潮時のデータであることに注意する必要がある。

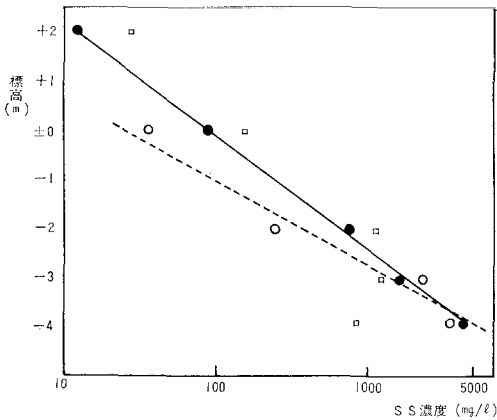


図-5 濃度の鉛直分布

波による浮遊底質の平均濃度分布に対する基礎式は, 底面から鉛直上向きに z 軸をとると次式で表わされる²⁾。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) + w_0 \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここに, ϵ_z : 鉛直方向の拡散係数, $\bar{c}$: 波の一周平均濃度, w_0 : 底質の沈降速度

ϵ_z を z 方向に一定として, 式(4)を境界条件

$$z=a \text{ で } \bar{c} = \bar{c}_a$$

$$z=h \text{ で } \epsilon_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + w_0 \bar{c} = 0$$

で解けば, 次式が得られる。

$$\frac{\bar{c}}{\bar{c}_a} = \exp \left[-\frac{w_0}{\epsilon_z} (z-a) \right] \dots\dots\dots (5)$$

上式と最もよく一致している図-5の●印のデータについて ϵ_z を求めると $\epsilon_z = 10.2 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$ が得られる。ただし, 沈降速度 w_0 は高さ約 4 m の現地水深に等しい大型沈降装置³⁾ を使って得られた $w_0 = 0.1 \text{ cm/sec}$ とした。M. G. Skafel⁴⁾ らは砂の場合について

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_z &= \beta a_* u_*^3 \\ \beta &= 8.7 \left(\frac{u_* D}{\nu} \right)^{-2.2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

と置いた。

ここに, a_* : 境界層外縁の軌道の長さ, u_* : 摩擦速度, D : 底質の粒径, ν : 動粘性係数

これは室内実験にもとづくもので, 入江ら⁵⁾ によって β の係数 8.7 を補正すれば, 室内実験の分布と適合することが確認されている。しかし微細な粒子の場合には粒径が小さくなくてもフロクの形成によって沈降速度はそれほど小さくならないので式(6)で表現することには無理があると考えられる。

図-6 は式(3)で求められる振動流速の最大値 $V_{\max}$ と自動採水器による濃度の関係を海底面上 0.3 m の観測値についてプロットしたものである。ただし, $V_{\max}$ は巻き上げの進行を考慮して採水時刻の5分前から128秒間の中で最大値をとってある。この図には先に述べた1月28日の他の波の小さい時のデータも一緒にプロットしてあるが, 高波浪時の観測データが少ないこともあって両者の間の回帰式は求められないが, 今後データの蓄積による成果が期待できる。

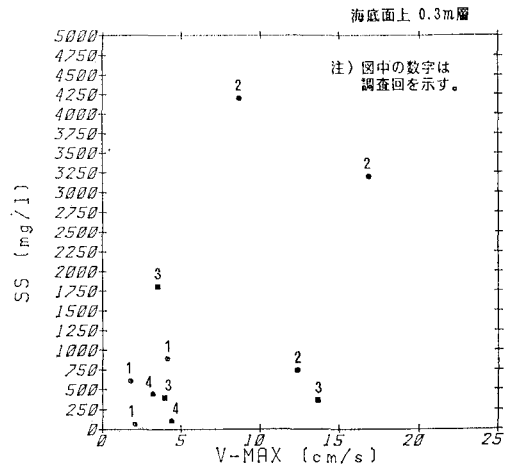


図-6 振動流の最大流速と濃度の関係

4. 流れによる巻き上げ

(1) 概 説

熊本港は潮差が大きく最大 4.5 m に達し, この時には潮流の流速は海底面近くでも 35 cm/sec 程度となることが観測されており, このように大潮位差の港湾においては流れと波の両者の作用によって生じる現地海域の巻き上げ現象をうまく説明するためには, 潮流による巻き上げを考慮することが不可欠であると考えられる。このような観点から, 流れと波とがそれぞれ単独に作用すると

きの巻き上げ現象を室内実験で調べることとし、流れに対する特性をみるために円形回転水路による実験を行った。

(2) 限界掃流力

底泥上に水を流すとき、流速を除々に増していくと表層の粒子が移動し始める。さらに流速を増すと底泥が小さな塊として浮上していく。底泥が巻き上げられ始めるときのせん断応力を限界掃流力と名付けている。この巻き上げ開始には種々の定義があるが、本稿では、底泥表面のいくつかの粒子が移動し始めたときとし、このときのせん断応力を τ_{el} とする。

(3) 巻き上げフラックス

楠田らによれば、巻き上げ開始後、初期の底泥の巻き上げフラックス E は次式で与えられる⁶⁾。

$$E = \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_{el}} - 1 \right)^n \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 α , n は底泥の種類によって決まる定数

(4) 実験装置及び実験方法

底泥の巻き上げフラックスを求めるために実験に用いた円形回転水路⁷⁾の概略を図-7に示す。

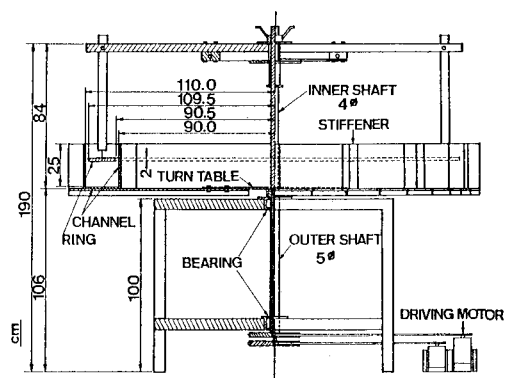


図-7 円形回転水路

円形水路（アクリル製、外径 220 cm、内径 180 cm、深さ 25 cm）は回転円盤上に固定されている。発泡スチロール製のリングは水面上に浮いた状態にあり、アーム先端のフックに接続している。回転水路とリングは、各々のモーター及び回転速度制御装置を有し、独立に回転できるようになっており、微粒子のせん断流下での巻き上げ実験をフロクを破壊せずに長時間連続して行うことが可能である。この水路内で熊本港（図-1 の A 点）より採取した泥で懸濁液をつくり、3 時間又は、15 時間静置して泥層をつくり、これに図-8 に示すように周期的に変化する最大 0.4 N/m^2 のせん断力を作用させ、このときの濃度を水路外壁に設けた採水装置で測定した。

(5) 実験結果

図-9 に15時間静置した底泥の巻き上げ量の時間変化

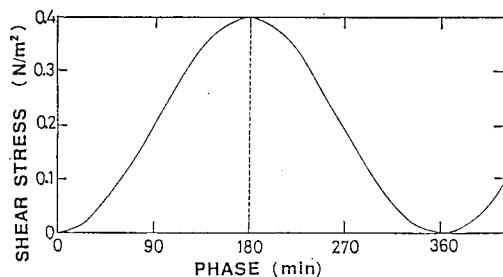


図-8 せん断力の周期変化

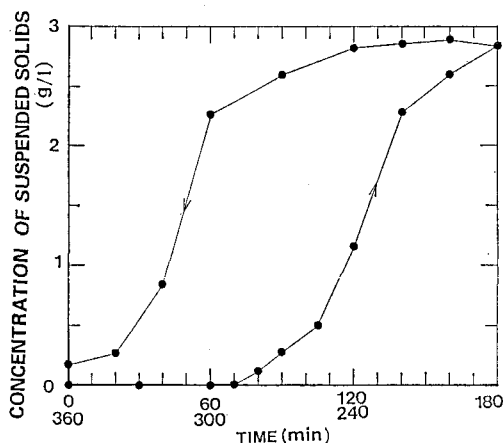


図-9 流れによる巻き上げ量

の実験結果を示す。4 の(2)で定義した限界掃流力は3時間沈降で $\tau_{el} = 0.047 \text{ N/m}^2$ 、15 時間沈降で 0.13 N/m^2 であり、沈降時間、換言すれば含水比が大きく効くことがわかる。

せん断力と巻き上げ量の関係をプロットすると図-10 が得られ、これから式(4)の定数 α , n を求めれば、巻き上げフラックスが算出されるが、ここでは実験データが少なく対象とした底泥について、これらの定数の確定的な値は得にくい。

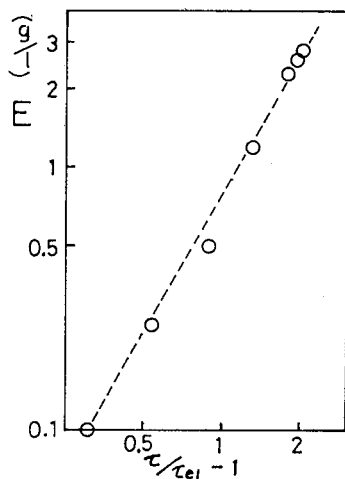


図-10 τ と E の関係

5. 波による巻き上げ

(1) 概 説

波の作用下における浮遊濃度の分布については、底質が砂の場合については従来から多数の研究がなされているが底質が粘土やシルトの場合については十分な研究がなされていない。永井ら⁹⁾の研究では波高減衰や底質の質量輸送を論じている。また P. Thimakorn⁹⁾の研究では室内実験で底面での巻き上げ濃度などを調べているが、底泥の特性による相違や現地での現象との対応が不明である。

ここでは熊本港の底泥の巻き上げ特性を調べ現地データとの対比を試みる。

(2) 実験装置及び実験方法

長さ 30 m, 幅 0.8 m, 高さ 0.95 m のピストン型造波機を有する長水路に長さ 2.8 m (1 波長), 厚さ 10 cm に熊本港から採取した底泥を一様に敷いた。用いた底泥は円形回転水路の実験の場合と同一である。底泥は現地の含水比と同じ状態のもの(自然含水比)と予め懸濁水をつくり水路内で自然沈降させたもの(自然沈降状態)の 2 種類である。後者は巻き上げられた底泥が沈降してゆるく堆積した状態で再び巻き上げられる状況を想定している。海水で水深を 40 cm に保ち、波高 17.7 cm, 周期 1.55 sec の非碎波の規則波を作用させ、長さ 2.8 m の底泥層の中央に配置したサイフォンで採水しガラスフィルターで濾過して濃度を測定した。

(3) 実験結果

波を作用させると底泥の表面で高濃度の厚さ 1~2 cm 程度の泥層が波の周期とともに往復運動し、やがて波の進行方向と上層へと広がっていく様子が観察された。また実験開始から徐々に濃度が増し、2~3 分経過すると濃度の増加が小さくなり、6 分経過した頃から再び増加し始めたので、波による振動流によって底泥の表層でゆるみが生じているものと考えられる。

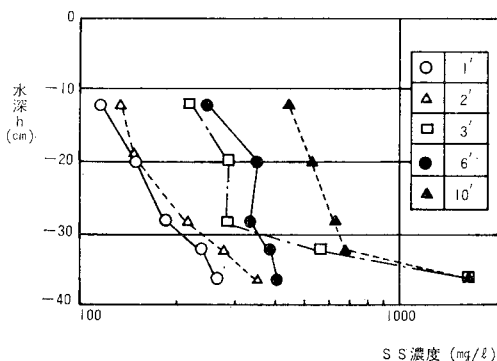


図-11 濃度の鉛直分布

図-11 は実験開始後 1 分~10 分における濃度の鉛直分布を示したものである。図中の黒い記号は自然含水比で白ヌギは自然沈降状態を示している。自然沈降状態では底泥がゆるく堆積しており短い時間で上方へ広がることからわかる。図に示したように底層がかなり高濃度となったり、あるいは上層と下層の濃度が一樣となることも測定されている。この実験での底面より 1 cm 上の沖~岸方向の流速の振幅は 20.0 cm/sec であったが、先に示した現地観測データでも振動流成分の流速が $V_{max} = 16.9$ cm/sec で、両者の値が近似しており、図-5, 図-11 の底面近傍の濃度に着目すれば両者はほぼ等しい値となっている。よって現地における底面流速と巻き上げ濃度が実験でも再現されていると言えよう。

6. あとがき

粘土やシルトのような微細な底質による航路・泊地の埋没対策の策定を目的として熊本港を対象に現地観測と模型実験を行い、多くの知見を得ることができた。ここで取り扱った問題に関する既往の研究が非常に限られていることもあって、得られた成果は埋没対策の検討に際し、多くの示唆を与えるものではあるが、底面での流速又は底面せん断力と巻き上げ量の関係が定式化され、定量的な評価が行えることが望まれるところである。

今後、さらに現地観測と模型実験を行い、データの蓄積によって現象の解明に努めたい。

最後に、現地観測に際し御尽力された第四港湾建設局八代港工務所及び三洋水路測量(株)の各位に深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 合田良実: 共分散法を用いた波向測定方式の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第 20 巻第 3 号, pp. 53~92, 1981.
- 2) 例えば, 石原隆次郎編: 水工水理学, pp. 656~657, 丸善, 1972.
- 3) 口田 登・足立一美・楠田哲也・金山 進: 底泥の静水中の沈降特性に関する実験, 第 38 回海岸工学講演会論文集, 1986.
- 4) Skafel, M. G., B. G. Krishnappan, Suspended sediment distribution in wave field, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 110, No. 2, A.S.C.E. pp. 215~230, 1984.
- 5) 入江 功・寺崎賢次・加藤一正: 砂れん上の底質の浮遊に注目した漂砂観測法について, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 360~364.
- 6) 楠田哲也: 底泥の輸送現象と水質に及ぼす影響, 水工学に関する夏期講習会テキスト, A コース, pp. A-7-1~A-7-22, 1983.
- 7) 二渡 了・海田輝之・楠田哲也・栗谷陽一: 円形回転水路とその流況特性, 九大工学集報, pp. 431~435, 1984.
- 8) 永井紀彦・山本督夫・Ludwig Figueroa: 波とやわらかい底質粘土との相互干渉に関する実験, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 608~612, 1983.
- 9) P. Thimakorn, An experiment of clay suspension under water wave, Proc. 17th Conf. on Coastal Engineering, 1980.