

進行波存在下における底泥の挙動および 波高減衰に関する実験的研究

五明美智男* ・ 矢内栄二**・ 小島 洋***
大槻 忠****・ 糸刈長敬*****

1. ま え が き

内湾域では河川からの流入土砂・陸上からの搬出ヘドロなどにより多量の汚染底泥が堆積している。その特徴としては 1) 微細な土粒子により構成され、2) 自然含水比が非常に高く、3) 含有有機物が多い点があげられる。これらの底泥は、潮流・波浪により容易に巻き上げ・沈降あるいは流動などの挙動を示し水域の恒常的な水質汚濁化・港湾航路の埋没の大きな原因となっており、問題の解明のためには流れや波の存在する場での底泥の挙動を予測する必要がある。

今までに行なわれてきた研究としては、底泥の流送特性として限界掃流力と飛び出し率の2つの基本量の定式化を試みた大坪¹⁾の研究、底泥の掃流現象について交換面の乱れから巻き上げ量の評価を試みた住友・石橋・栗山²⁾の研究、波と底質との相互干渉に関し実験的に考察を加えた永井・山本・Figuerola L.³⁾の研究などがあるが未だ予測手法の開発には至っていない。特に、波作用下において、底泥の物性の違いを考慮に入れ実験的に検討した例はほとんどないのが現状である。

本報告は、海域における底泥の挙動を把握しその予測手法を確立するための第1段階として、底泥の含水比・粘性等の物性の違いによる進行波下の底泥の挙動機構を実験的に解明することを目的としたものである。

2. 実験装置・方法

実験に用いた施設は、図-1に示すような長さ 25 m、幅 40 cm、深さ 1.5 m で岸側に反射波の影響をなくするために 1/20 の勾配を設けた油圧制御のピストン型2次元造波水路であり、水路中央部に長さ 2.5 m、深さ 7 cm の溝を設け底泥を敷きつめられるようにしたものである。今回、底泥として用いた試料は、粒子比重 2.60、中央粒径 $3.4\ \mu\text{m}$ 、粒度特性として砂分 4%・シルト分 42%・粘土分 54%、コンシステンシー指数として液性

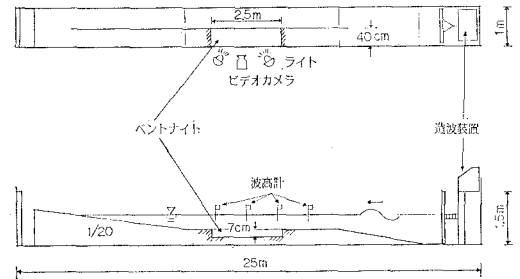


図-1 実験装置

限界 160.2%、塑性限界 24.7% のベントナイトである。

実験は、含水比 200~270%、泥厚 7 cm のベントナイト底泥に対し、水深 20 cm 一定の条件で入射波高 0.3~8.3 cm、周期 1.05 秒の波を作用させ、合計 91 ケースについて以下のような測定を行なった。

- (1) 底泥上を進行する波の波高減衰率の測定
- (2) 底泥表面上のリップルの発達過程の観察
- (3) 底泥の巻き上げの観察
- (4) 底泥の振動の波高の測定
- (5) 底泥の振動と波運動との位相差の測定

また、底泥の物性に関しては、含水比の測定、含水比に伴って変化する見かけ密度の測定の他に、底泥の流動性を調べるために円筒型回転粘度計 (B8H 型、東京計器製) による粘度試験を行なった。

なお、永井らは圧密の進行を考慮にいたした実験を行なっているが、本報告では試料作成後数時間で実験を終了しており、圧密の影響は無視できるものと考えられる。

3. 底泥の物性

底泥の物性としては、構成要素・粒度組成・液性限界・塑性限界などのように含水比の影響を受けないものと、密度・粘度など含水比によって変化するものとに分けられる。本報告では、含水比により変化する物性のうち、特に見かけ密度および底泥のレオロジー的性質についての流動特性を調べた。流動を示す特性値としてはずり速度・ずり応力があり、また塑性流動を示す特性値としては降伏値等があげられる。

図-2 は、各含水比でのベントナイトの流動曲線を示

* 正会員 水修 東亜建設工業(株)技術研究所

** 正会員 工修 東亜建設工業技術研究所

*** 東亜建設工業技術研究所

**** 正会員 農博 東亜建設工業(株)技術研究所

***** 正会員 農博 東京水産大学 海洋環境工学科

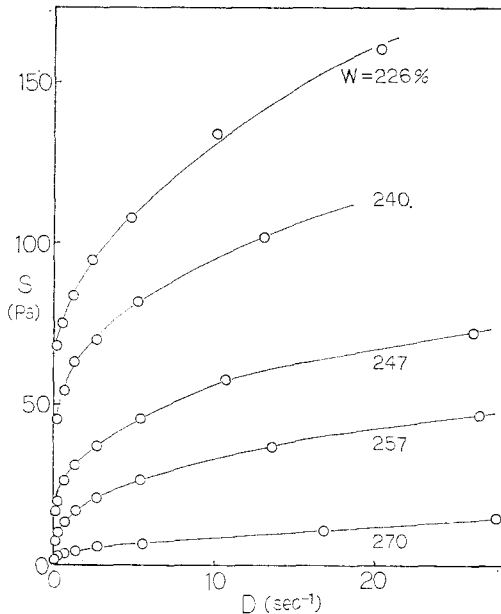


図-2 ベントナイトの流動曲線

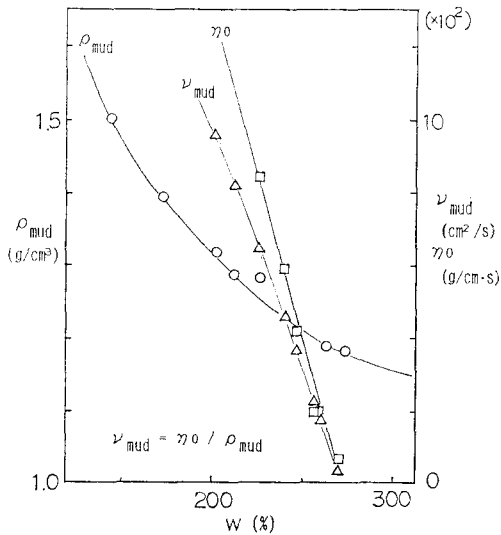


図-3 ベントナイトの粘性

したもので、横軸にずり速度 D 、縦軸にずり応力 S 、傾きが粘度を表わしている。ベントナイトは含水比が小さいほど粘度が高く、また流動曲線は非ニュートン流体としての性質をもつことがわかる。この曲線から低ずり速度領域 ($0 \sim 1.0 \text{ sec}^{-1}$) での平均の粘度 η_0 を算定し、見かけ密度 ρ_{mud} と η_0 を用いることによりベントナイト泥の動粘性係数 ν_{mud} を算出した(図-3)。今回の実験の含水比範囲では、 η_0 と含水比の間にはほぼ比例関係が認められた。なお、含水比 200, 211% のベントナイトについても粘度試験を行なったが粘度が高すぎて測定が不可能であったため、 η_0 を外推して求めた。

4. 底泥の運動

底泥は入射波の波高が大きくなるに伴い、次のような挙動を示す。

- (1) 底泥表面上でのマッドリップル(泥漣)の発生
入射波高がかなり小さい時点で、底泥の表面上にマッドリップルが発生する。
- (2) マッドリップルの発達
上述 (1) の状態から入射波高が大きくなるにつれ、リップルの波長・波高も大きくなる。また、リップルの波形は波の進行方向に後傾した非対称形をなす。
- (3) マッドリップル頂部からの底泥の巻き上げ
さらに入射波高が大きくなると、リップルの頂部から底泥の巻き上げが見られるようになる。
- (4) 底泥の振動
(1) から (3) で述べた現象は、底泥表面上に見られるものであるが、ある程度波高が大きくなると底泥自体も振動するようになる。
- (5) 底泥の波状運動および破壊
(4) の底泥の振動はしだいに大きくなり、最後に波状運動あるいは図-4に示すような破壊現象(波の周期に対応し $1 \rightarrow 7 \rightarrow 1$)を示すようになる。

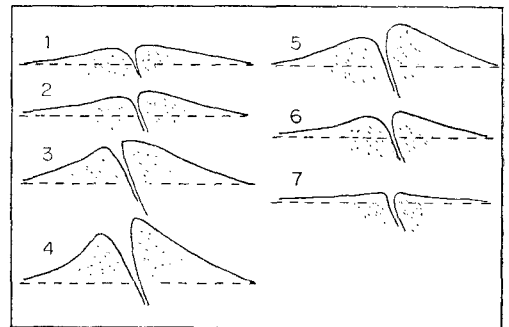


図-4 底泥の破壊現象

これらの現象の発生時期・規模等は底泥の物性により多少異なるものと考えられる。そこで、底泥の運動についてさらに検討を加えるために、マッドリップルの発達および底泥の振動に対する含水比の影響について調べた。

図-5 は、泥の中央部分(泥端から 1.25 m)において測定したリップルの波長 λ と底泥含水比 W の関係を沖側固定床部での入射波高 $H1$ をパラメーターとして示したものである。リップル波長は入射波高が大きくなるに伴い大きくなるが、含水比 247~250% 付近において極大値を示している。同様に、入射波側泥端から 1 m, 2 m の位置での底泥の振動の波高 $Hm1$, $Hm2$ と含水比の

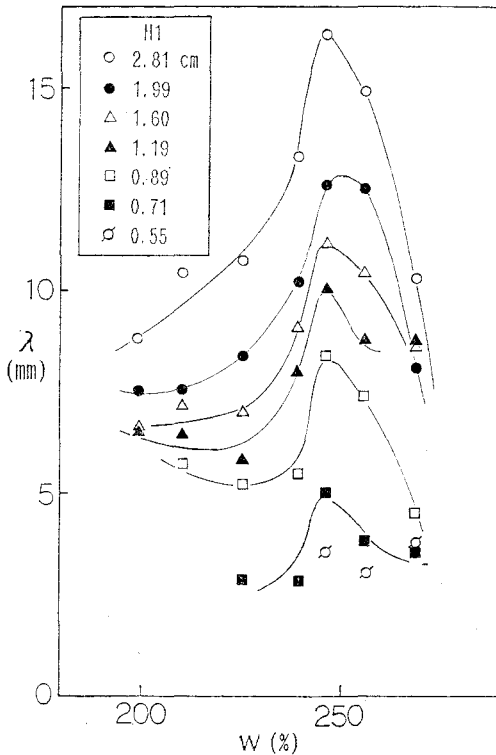


図-5 リップル波長と含水比の関係

関係について入射波高をパラメータとして示したのが図-6である。底泥の振動の波高はどの含水比においても入射波高が大きいほど大きく、同一入射波高に対しては含水比 247~250% 付近に極大値が見られる。

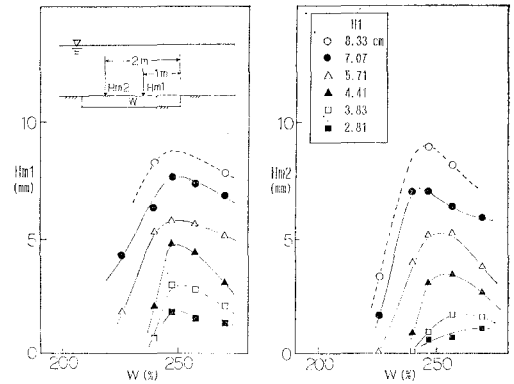


図-6 底泥振動の波高と含水比の関係

5. 底泥と波との相互干渉

4. では主に底泥の運動について述べたが、底泥の運動が大きくなると、底泥と波との間に相互干渉が生じるようになり、本実験でも永井らの報告と同様に底泥上を進行する波の波高減衰がみられた。図-7 は、底泥上を進行する波の波高変化を含水比ごとに示したものであり、横軸は波高の測定位置、縦軸は波高値を示す。波高の減少は、入射波高が大きいほど大きく、同一波高に対しては 247~250% 付近で最も大きくなるようである。そこで、同図より底泥上を単位距離だけ進む間の波高減衰率 D_w を算出し、入射波高 $H1$ により示したのが図-8 であるが、247~250% 付近に波高減衰率の極大値が存在することがわかる。

また、図-9 は入射波高 8.3 cm の時の底泥の運動と

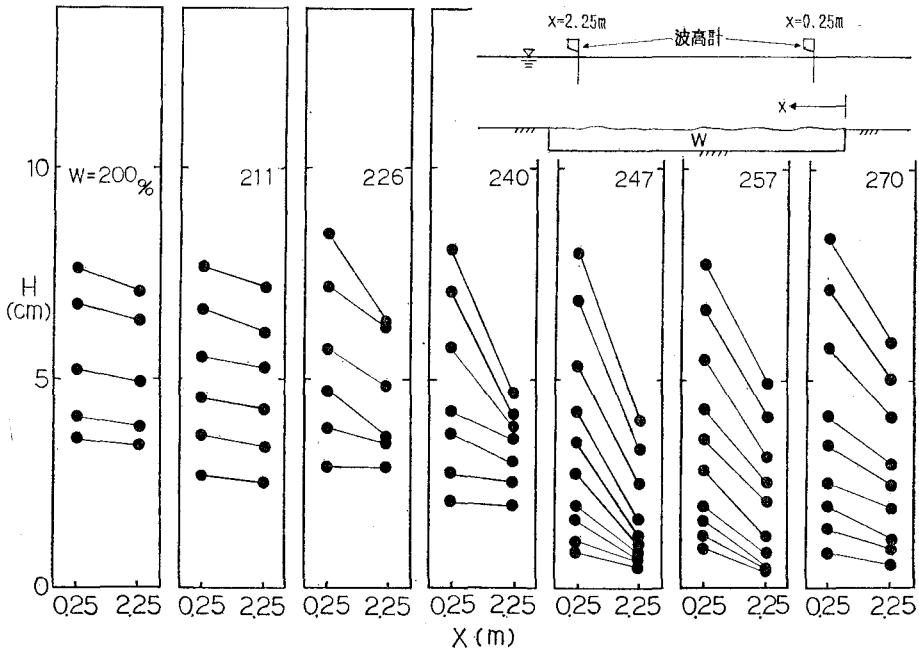


図-7 底泥上を進行する波の波高減衰

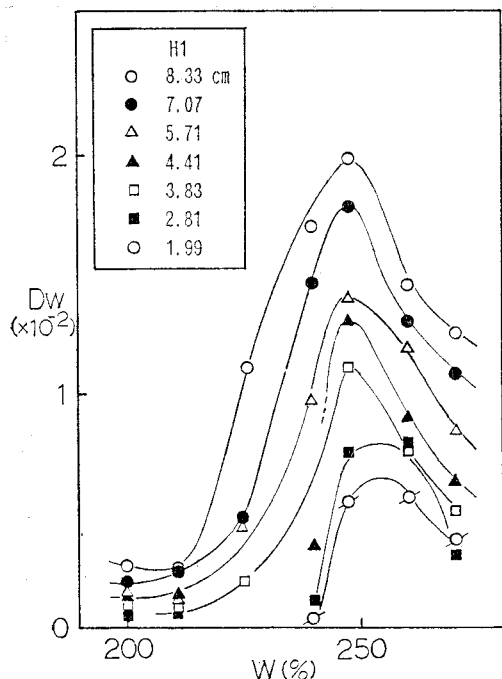


図-8 波高減衰率と含水比との関係

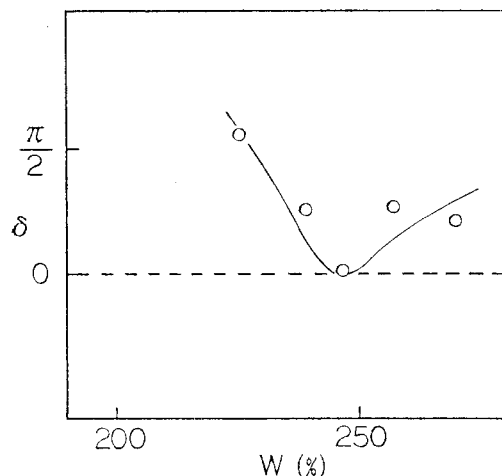


図-9 底泥の振動と波との位相差

波との位相差 δ を含水比に対して示したものである。ただし、縦軸の位相差は波に対する底泥振動の位相の進みをプラスとして示している。この図より、底泥振動と波との位相差がゼロとなる点が存在し、その含水比は 4. で述べたリップル波長・底泥振動の波高および上述の波の波高減衰率が極大値をとるときの含水比とほぼ等しい 247% 付近に相当していることがわかる。

6. 考 察

以上の結果から、底泥上を進行する波の波高減衰や底泥の運動は、波と底泥振動との位相差に関係しているも

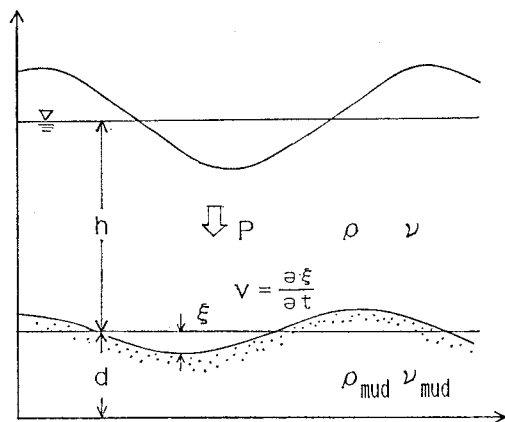
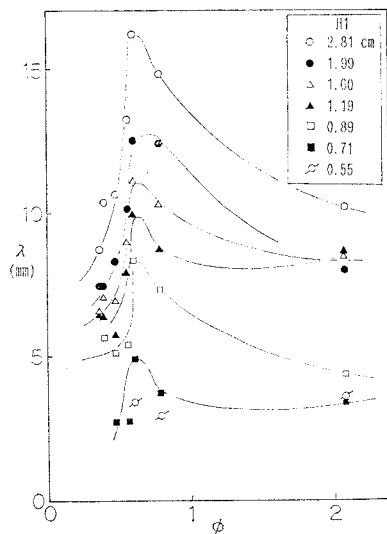


図-10 2層モデルの模式図

のと考えられる。そこで、Dalrymple・Liu の扱いを参考に、図-10 に示すような動粘性係数 ν 、密度 ρ なる上部流体（水）と動粘性係数 ν_{mud} ($=\eta_0/\rho_{\text{mud}}$)、見かけ密度 ρ_{mud} なる下部流体（底泥）の 2 層モデルによる鉛直方向のエネルギーの伝達について考える。いま、上部には鉛直下向きに圧力 P がかけられており、泥の振動面には変位 ξ による流速 $V=\partial\xi/\partial t$ が存在する。このとき上部の流体は下部の泥に対し $P \cdot V$ なる仕事を行っており、特に波と底泥振動が同位相となる時に $P \cdot V$ のする仕事が最大となり底泥の運動が最も大きくなるものと考えられる。また、波のエネルギー伝達が大きくなるため、波高減衰も大きくなる。

今回の実験で見られた含水比 247% 付近の現象は、底泥厚 7 cm、波の周期 1.05 秒等の実験条件による特異的なものとも考えられる。そこで、現象を支配する物理量として、

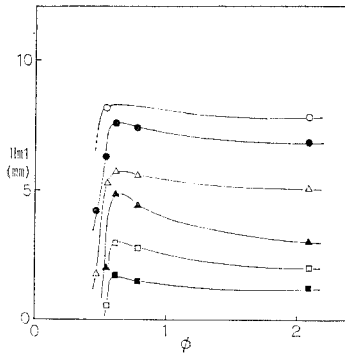
図-11 リップル波長と ϕ の関係

底泥の厚さ d

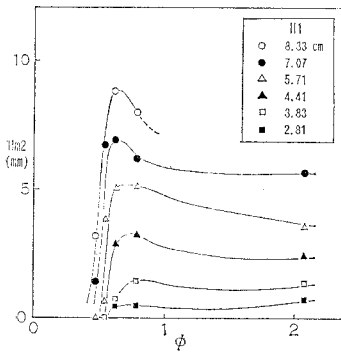
底泥の動粘性係数 ν_{mud}

波の角振動数 $\sigma (=2\pi/T)$

を考え、底泥上の層流境界層厚さと底泥の厚さから求ま



(a)



(b)

図-12 底泥振動の波高と ϕ の関係

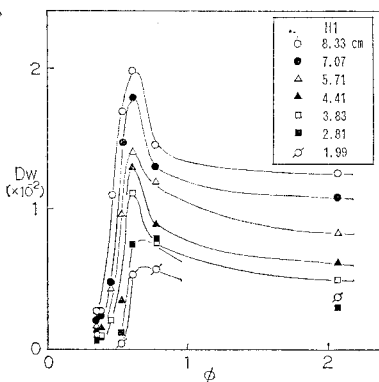


図-13 波高減衰率と ϕ の関係

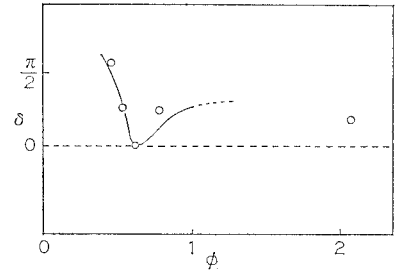


図-14 底泥振動と波との位相差と ϕ との関係

る無次元数 $\phi = \sqrt{\sigma/2 \cdot \nu_{\text{mud}}} \cdot d$ により前掲の 図-5, 6, 8 および 9 の結果を整理し直したものが 図-11 から 14 である。リップル波長・底泥振動の波高・波の波高減衰は $\phi=0.6$ 付近で極大となっており、 ϕ により統一的に整理できることがわかる。

7. あとがき

今回報告したものは、波の周期と底泥厚さは一定のままで泥の粘性を変えて行なった実験の結果である。今後波の周期・底泥厚さおよび波の周期を変化させた実験を行ないデータを積み重ねていけば、波浪条件・底泥厚さ・室内試験による見かけ密度・粘性等を知ることにより、底泥上の波高減衰や底泥の運動を予測することが可能になるものと思われる。

最後に、実験およびデータ整理にあたり、当時東京水産大学海洋環境工学科学部学生であった大塚佳代子氏、戸部伸一氏の協力を得たことを付記し感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 大坪国順：底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究，国立公害研究所研究報告，No. 42, 1982.
- 2) 住友 恒・石橋道生・栗山由彦：波運動による底泥物質の掃流現象に関する基礎研究，土木学会第 22 回海岸工学講演会論文集，pp. 367~370, 1975.
- 3) 永井紀彦・山本督夫・Ludwing Figueroa：波とやわらかい底質粘土との相互干渉に関する実験，土木学会第 30 回海岸工学講演会論文集，pp. 608~612, 1983.
- 4) 五明美智男・大槻 忠・糸淵長敬：底泥の初期巻き上げに関与するマッドリップルの発達過程について，土木学会第 40 回年次講演会，1985.
- 5) Dalrymple, R. A. and P. L. F. Liu: Waves over soft muds, A two layer fluid model, Journal of Physical Oceanography, Vol. 8, pp. 1121~1131, 1978.