

波によって発生したマッドリップルの安定性に関する研究

矢 内 栄 二*

1. はじめに

工業地帯に接した内湾域では、経済の高度成長に伴い大量の工業排水がほとんど未処理のまま放出されたため重金属などの含有有害物質によって環境条件が重大な影響を受けている。このような有害物質を含む海底のヘドロを処理するには、浚渫によって汚染ヘドロを取除く方法などが行われるものの、恒久的な浚渫中の汚染物質の処理方法としては数多くの問題を抱えている。こういった中で、最近注目を集めている処理方法として汚染底泥の上に砂をかぶせ海水との直接的な接触を防止する方法がある（覆砂法）。米国ではこの方法がすでに試みられており、ある程度の成果を収めつつあることが最近報告されている¹⁾²⁾。しかし、米国での例は外海からの波浪のまったく及ばない複雑な入り江の最奥部での施工例であったことから、日本国内で問題となるような波浪の存在する湾内での波や流れが存在する場所での覆砂厚や底泥の挙動などの設計上の問題については、まったく触れられていない。こういった問題を設計する方法として、漂砂で利用されているシールズ数のようなパラメータによって考えられれば良いが、底泥のような粘着性粒子の場合には砂と異なり抵抗力として単一粒子としての取り扱いをすることはできない。従って、底泥全体としての抵抗力を取り扱う方法が考えられ、例えば流体としての粘性力や粘性土としてのせん断強度があげられる。底泥を粘性土として取り扱う場合、従来の土質試験機で測定されるせん断強度の最小値は 10 gf/cm^2 (980 Pa) 程度であり、底泥のような軟らかい (0.01 gf/cm^2 (0.98 Pa) $\sim$ 1 gf/cm^2 (98 Pa)) 粘着性粒子のせん断強度を測定することが困難であった。一方、流体として取り扱う場合、覆砂を行なった底泥が十分な強度を持たない時には砂との混合した状態となるため、流体としての取扱いが難しくなる。そこで著者らは、軟らかい底泥の強度を計測するせん断強度計を開発し、底泥の特性についても強度に対するパラメータにより解析を行うことを可能にした³⁾。

ところで、底泥上に波が進行すると、底泥の種類によっては、底泥面上にマッドリップル（泥漣）が発生する

ことが知られている。マッドリップルは波のせん断強度が増加するにつれて発達し、やがて底泥全体の巻上げに移行する。従って、現況の底泥面上の様子を知る場合や、構造物によって底泥上を進行する波を抑止しようとするとき、さらに覆砂を行なう場合などに、マッドリップルは設計上の指標の一つとなるものであり、マッドリップルが発生しないか、あるいは発生しても巻上げりが発生しない状態にとどめておくことが必要となる。

本研究は、底泥のせん断強度によって底泥の動的挙動を説明する試みの一つとして、底泥面に発生したマッドリップル（泥漣）の安定性について、底泥のせん断強度 τ_{mud} と波によるせん断応力 τ_{wave} との比 τ_* という新しい無次元パラメータによって、理論的に研究を行ったものである。

2. せん断強度測定装置の概要

開発したせん断強度測定装置は、底泥の研究でしばしば使用されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾ 粘度計と従来から土質試験で使われてきたベーンせん断試験機の両者の性格をもつものである。従来の土質試験機、例えばベーン試験機でも底泥のせん断強度を精度よく測定することが困難であったことをふまえて、駆動部分に高精度パルスモーターを用い、土質試験法で標準とされるベーン回転速度 0.1 deg/sec を 0.5% 以下の誤差で発生させるようにした。また、回転軸に働く負荷測定は高感度トルク変換器を使用して、せん断強度が 0.01 gf/cm^2 (0.98 Pa) の単位で計測できるようにした。装置は、人為的な接触による計測誤差をできるだけ排除するため、計測器をセンサーユニット本体、中継アンプ、制御装置（パーソナル・コンピュータ）の3つの部分で構成し、制御をすべてパーソナル・コンピュータによって行うようにした。センサーユニットにはパルスモーターと高感度トルク変換器が内蔵されており、駆動軸の先端にベーン羽根が取り付けられている。高感度トルク変換器としては $10 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ ($0.98 \text{ N}\cdot\text{m}$) と $2 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ ($0.196 \text{ N}\cdot\text{m}$) の2種類を使用し、 $2 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ ($0.196 \text{ N}\cdot\text{m}$) を更にギヤによって $500 \text{ gf}\cdot\text{cm}$ ($0.049 \text{ N}\cdot\text{m}$) のトルクとして計測できるようにしてある。中継アンプはパルスモーターを制御するドライバ

* 正会員 工修 東亜建設工業(株)技術研究所

とトルク変換器からの出力を増幅する動歪アンプ及びA/D変換器で構成されており、この中継アンプはパーソナル・コンピュータ内に挿入されたタイマーカウンタ・インターフェースとデジタル入・出力インターフェースからの信号によって制御される。制御方法は、まずパーソナル・コンピュータでの対話型のメニュー画面によって、回転速度、サンプリングピッチ、回転終了角度、初期負荷を入力する。ここで、初期負荷とはベーン羽根を試料の中に入れて回転させた場合の負荷であり、ギヤの噛み合わせによってわずかに変動するが、ほとんど微小な一定値である。これらをすべて入力した後、ベーン羽根上端が試料上端と一致するように静かに試料内に挿入し、パーソナル・コンピュータからスタート信号を出すことによって計測を開始するものである。

3. 波の場における底泥の運動形態

底泥上に波が進行するとき、底泥は表-1のような運動形態を示すことが知られている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。すなわち、ベントナイトの場合には波高が大きくなるにつれて底泥表面にリップルが発生し、さらに波高の増大とともに底泥の巻上がりが見られるようになり、やがて底泥層全体の波状運動、破壊へと至る。一方、カオリンの場合にはベントナイトのような大きなリップルの発生は見られないが、底泥の移動の初期状態では小さなリップルとも言えるしわが底泥表面に発生し、これがさらに発達するとともにやがて底泥が巻上がり始め、やがて底泥層が波状運動した後に底泥表面に波の進行方向と直角にひび・亀裂が入り破壊に至る。本研究はベントナイトの場合に発生するリップルの安定性について理論的検討を行なうものである。

表-1 底泥の運動形態

波 高	ベントナイト	カオリン
小	(1)リップルの発生	(1)底泥表面にしわが入る
	(2)リップル頂部からの底泥の巻上げ	(2)もや状の層が発生
	(3)底泥の波状運動	(3)底泥の波状運動
	(4)破壊	(4)底泥表面にひび・亀裂
大		(5)破壊

4. 不安定問題によるマッドリップルの安定性 (1) 基礎方程式

流体中において発生した擾乱の安定性を取り扱う手法として河川工学では各種の不安定理論が蛇行の発生を取り扱う際に古くから行なわれており、Kennedy⁸⁾、林⁹⁾、中川・辻本¹⁰⁾などの研究がある。こういった安定理論は、流体と底面(河床)に発生した擾乱が、両者の伝播速度の差や密度の差等によって発達するか消滅するかを数学的安定性と結びつけたものである。底泥面上に発生

するマッドリップルも同様に、底泥面上に発生した擾乱が上層の流体によって増幅されたものと考えられる。この不安定性の要因として波のせん断力と底泥の抵抗力のバランスと考えると、流れのモデルとしては河川の河床波の解析で林・大西¹¹⁾によって導入されているせん断流モデルを使用する事ができる。この時、連続方程式とReynolds 方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u, w : x, z 方向の流速成分、 p : 圧力、 ε : 渦動粘性係数、 ξ, η : 上層流体と底泥表面の微小擾乱である。

実験室内で観察されるマッドリップルについて見ると、発生時のリップルピッチが波の位相に対してほとんど変化せず、リップル波高のみが変化する周期的な現象であることが認められる。このことから、波の場でのマッドリップルの発達についても同様流れと類似の現象が問題になると思われるので、大胆であり問題があるかもしれないが、現象を波の軌道流速の最大値の流速分布を持つ流れの場として置き換えて考える。せん断流モデルである事から慣性項を残すと、式(2)、(3)は次のように書き換えられる。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \quad \dots\dots\dots (5)$$

主流の流速分布として微小振幅波の軌道流速の最大値をとり、底面での軌道流速を底泥面でのせん断力としての slip velocity と考えると、流速分布は次式となる。

$$U(z) = U_0 \cosh k_w z \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $U_0 = \pi H / T \sin k_w h$ 、 H : 水面波の波高、 T : 水面波の周期、 h : 水深、 k_w : 水面波の波数。

断面平均流速 U_m 、slip velocity U_b 、表面流速 U_s はそれぞれ

$$U_m = U_0 \sin h k_w h / k_w h$$

$$U_b = U_0 = (k_w h / \sin h k_w h) U_m$$

$$U_s = U_0 \cosh h k_w h$$

となる。また、渦動粘性係数は林・大西と同様に断面平均値をとって、

$$\varepsilon = \alpha U_s h \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与える。ここに、 $\alpha = \kappa / 6$ 、 κ : カルマン定数。

式(7)から乱流 Reynolds 数 $Re\epsilon$ は,

$$Re\epsilon = \phi_0/\alpha \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここに, $\phi_0 = U_m/U_f$ である。

(2) 基本式と境界条件の線型化

以上の基礎式を平均量と変動成分を分離して,

$$\left. \begin{aligned} u(x, z, t) &= U(z) + u'(x, z, t) \\ w(x, z, t) &= w'(x, z, t) \\ p(x, z, t) &= P(z) + p'(x, z, t) \\ \xi(x, t) &= \xi'(x, t) \\ \eta(x, t) &= \eta'(x, t) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

とおき, $u' \ll U$, $w' \ll U$, $p' \ll P$ とすると, 基礎方程式と境界条件はそれぞれ次のようになる。

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$U \frac{\partial u'}{\partial x} + w' \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} + \epsilon \left(\frac{\partial^2 u'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$U \frac{\partial w'}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} + \epsilon \left(\frac{\partial^2 w'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

境界条件:

$$z=h: \quad p' = \rho g \xi' \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$U_s \frac{\partial \xi'}{\partial x} = w' \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} = -k_w^2 U_0 \xi' \cosh k_w h \quad \dots\dots\dots (15)$$

$z=0$:

$$U_b \frac{\partial \eta'}{\partial x} = w' \quad \dots\dots\dots (16)$$

一方, 底泥面の擾乱が微小である時, 底面での摩擦抵抗が平坦の時とほぼ等しいと考えられると, 次式が得られる。

$$u_f' = (U_f/U_b)^2 u_b \quad \dots\dots\dots (17)$$

これより,

$$u' = \frac{U_b}{2U_f^2} \epsilon \left(\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} \right) + k_w^2 U_0 \xi' \cosh k_w \quad \dots\dots\dots (18)$$

上式に無次元量

$$\left. \begin{aligned} x/h &\rightarrow x_*, \quad z/h \rightarrow z_*, \quad U(z)/U_m \rightarrow U_*(z_*), \\ U_s/U_m &\rightarrow U_{s*}, \quad U_b/U_m \rightarrow U_{b*}, \quad U_0/U_m \rightarrow U_{0*}, \\ u'/U_m &\rightarrow u'_*, \quad w'/U_m \rightarrow w'_*, \quad \eta'/h \rightarrow \eta'_*, \quad \xi'/h \\ &\rightarrow \xi'_*, \quad P(z)/\rho g h \rightarrow P(z_*), \quad p'/\rho g h \rightarrow p'_*, \quad k_w h \\ &\rightarrow k_{w*}, \quad k h \rightarrow k_* \end{aligned} \right\}$$

を導入しさらに, 上層流体の微小擾乱を

$$\xi'_*(x_*, t) = \xi_0 e^{ik_*(x_* - ct)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

として与え, それによって生ずるその他の変動成分を,

$$\left. \begin{aligned} u'_*(x_*, z_*, t) &= \hat{u}(z_*) e^{ik_*(x_* - ct)} \\ w'_*(x_*, z_*, t) &= \hat{w}(z_*) e^{ik_*(x_* - ct)} \\ p'_*(x_*, z_*, t) &= \hat{p}(z_*) e^{ik_*(x_* - ct)} \\ \eta'_*(x_*, t) &= \eta_0 e^{ik_*(x_* - ct) - i\theta_w} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (20)$$

として与えたとき, 基礎式と境界条件は次のようになる。

$$ik_* \hat{u} + \frac{d\hat{w}}{dz_*} = 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$F_r^2 \left(ik_* U_* \hat{u} + \hat{w} \frac{dU_*}{dz_*} \right) = -ik_* \hat{p} + \frac{F_r^2}{Re\epsilon} \left(-k_*^2 \hat{u} + \frac{d^2 \hat{u}}{dz_*^2} \right) \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$F_r^2 (ik_* U_* \hat{w}) = \frac{d\hat{p}}{dz_*} + \frac{F_r^2}{Re\epsilon} \left(-k_* \hat{w} + \frac{d^2 \hat{w}}{dz_*^2} \right) \quad \dots\dots\dots (23)$$

境界条件:

$z_*=1$:

$$\hat{p} = 0 \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\hat{w} = ik_* U_{s*} \xi_0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$\frac{d\hat{u}}{dz_*} + ik_* \hat{w} = -k_{w*}^2 U_{0*} \xi_0 \cosh k_{w*} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$z_*=0$:

$$\hat{w} = ik_* U_{b*} \eta_0 e^{-i\theta_w} \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$\frac{d\hat{u}}{dz_*} + ik_* \hat{w} = -k_{w*}^2 U_{0*} \eta_0 \cosh k_{w*} + \frac{2}{\alpha U_{b*} \phi_0} \hat{u} \quad \dots\dots\dots (28)$$

ここに, $Fr = U_m/\sqrt{gh}$, $Re\epsilon = U_m h/\epsilon$, ξ_0 , η_0 : $t=0$ における上層流体の擾乱と底泥面の擾乱の振幅, k_* : 擾乱の波数, u , w , p : z_* のみの複素関数, c : 上層流体の擾乱の複素伝播速度 ($c = c_R + c_I$), c_R : 上層流体の擾乱の移動速度, c_I : 上層流体の擾乱の増幅率, θ_w : 底泥擾乱の上層流体の擾乱に対する位相差。

式(21)~(23)を整理して $U_* = 1$ とすると, 次の線型微分方程式が得られる。

$$\frac{d^4 \hat{w}}{dz_*^4} - A_1 \frac{d^2 \hat{w}}{dz_*^2} + A_2 \hat{w} = 0 \quad \dots\dots\dots (29)$$

ここに, $A_1 = 2k_*^2 + ik_*^* Re\epsilon$, $A_2 = k_*^4 + ik_{w*}^2 k_* U_{0*} Re\epsilon + ik_*^3$ 。

式(29)の解として次式が得られる。

$$\hat{w}(z_*) = C_1 \exp(\lambda_1 z_*) + C_2 \exp(-\lambda_1 z_*) + C_3 \exp(\lambda_2 z_*) + C_4 \exp(-\lambda_2 z_*) \quad \dots\dots\dots (30)$$

ここに, $\lambda_1 = ((A_1 + (A_1^2 - 4A_2)^{1/2})/2)^{1/2}$, $\lambda_2 = ((A_1 - (A_1^2 - 4A_2)^{1/2})/2)^{1/2}$ 。

積分定数 $C_1 \sim C_4$ は境界条件から次のようになる。

$$[a_{ij}] [C_j/\xi_0] = \{b_i\} \quad \dots\dots\dots (31)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= (\lambda_1 - k_{w*} U_{0*} \sinh k_{w*} - ik_* \lambda_1 / Re\epsilon + i\lambda_1^3 / k_* Re\epsilon) \exp(\lambda_1), \\ a_{12} &= (-\lambda_1 - k_{w*} U_{0*} \sinh k_{w*} + ik_* \lambda_1 / Re\epsilon - i\lambda_1^3 / k_* Re\epsilon) \exp(-\lambda_1), \\ a_{13} &= (\lambda_2 - k_{w*} U_{0*} \sinh k_{w*} - ik_* \lambda_2 / Re\epsilon + i\lambda_2^3 / k_* Re\epsilon) \exp(\lambda_2), \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
a_{14} &= (-\lambda_2 - k_{w*} U_{0*} \sinh k_{w*} + i k_{*} \lambda_2 / Re \varepsilon \\
&\quad - i \lambda_2^3 / k_{*} Re \varepsilon) \exp(-\lambda_2), \\
a_{21} &= \exp(\lambda_1), \\
a_{22} &= \exp(-\lambda_1), \\
a_{23} &= \exp(\lambda_2), \\
a_{24} &= \exp(-\lambda_2), \\
a_{31} &= \lambda_1^2 \exp(\lambda_1), \\
a_{32} &= \lambda_1^2 \exp(-\lambda_1), \\
a_{33} &= \lambda_2^2 \exp(\lambda_2), \\
a_{34} &= \lambda_2^2 \exp(-\lambda_2), \\
a_{41} &= -\lambda_1^2 - k_{*}^2 + (U_{0*}/U_{b*}) k_{w*}^2 \cosh k_{w*} \\
&\quad + 2\lambda_1 / \alpha U_{b*} \phi_0, \\
a_{42} &= -\lambda_1^2 - k_{*}^2 + (U_{0*}/U_{b*}) k_{w*}^2 \cosh k_{w*} \\
&\quad + 2\lambda_1 / \alpha U_{b*} \phi_0, \\
a_{43} &= -\lambda_2^2 - k_{*}^2 + (U_{0*}/U_{b*}) k_{w*}^2 \cosh k_{w*} \\
&\quad + 2\lambda_2 / \alpha U_{b*} \phi_0, \\
a_{44} &= -\lambda_2^2 - k_{*}^2 + (U_{0*}/U_{b*}) k_{w*}^2 \cosh k_{w*} \\
&\quad - 2\lambda_2 / \alpha U_{b*} \phi_0, \\
b_1 &= i k_{*} / F_r^2, \\
b_2 &= i k_{*} U_{s*}, \\
b_3 &= (k_{w*}^2 U_{0*} \cosh k_{w*} - k_{*}^2 U_{s*}) k_{*} i, \\
b_4 &= 0
\end{aligned}$$

5. 底泥輸送の安定解析

4. の理論によって計算された上層流体の擾乱に対する結果を用いて、マドリッブルの安定性を検討する。まず、無次元化された底泥輸送量の連続式は、

$$\frac{\partial \eta'_*}{\partial t_*} + \frac{\partial \Phi_*}{\partial x_*} = 0 \quad (\text{at } z_* = \eta'_*) \quad (32)$$

となる。ここに、 $\Phi_* = q_b / \sqrt{gh_{mud}^3 \rho_{mud} / \rho_0}$ 、 $t_* = t / h_{mud} \times \sqrt{\rho_0 / \rho_{mud}}$ 、 q_b : 単位幅当りの底泥輸送量、 ρ_{mud} 、 ρ_0 : 底泥及び水の密度、 h_{mud} : 対象となる強度の底泥厚さ、である。

底泥輸送量に関する式として、漂砂量式で提案されているパワーモデルに、底泥の粘着力に起因する波のせん断力と底泥輸送量の遅れ δ を考慮した次式を適用する。ただし、無次元せん断力としては波のせん断力 τ_{wave} と底泥のせん断強度 τ_{mud} の比 τ_* を考える。

$$\Phi_* = \alpha_2 (\tau_* (x_* - \delta_*) - \tau_{*c})^n \quad (33)$$

ここに、 $\tau_* = \tau_{wave} / \tau_{mud}$ 、 τ_{*c} : 無次元限界せん断力、 δ_* : 底泥の粘着力に起因する波のせん断力と底泥輸送量の遅れ距離を水深で無次元化したもの、 α_2 、 n : 定数。

式 (32)、(33) を整理すると次式が得られる。

$$\frac{\partial \eta'_*}{\partial t_*} + \alpha_2 \frac{\partial (\tau_* (x_* - \delta_*) - \tau_{*c})^n}{\partial x_*} = 0 \quad (\text{at } z_* = \eta'_*) \quad (34)$$

ここに、 $\alpha_3 = \alpha_2 (h_{mud} / h)^2$ 。

η'_* を微小量として式 (34) を $z_* = 0$ のまわりに展開

し、式 (20) を代入した後整理すると、底泥擾乱の複素伝播速度として次の式 (35) が得られる。

$$c = \Phi_0 E \exp(-i k_* \delta_*) \quad (35)$$

ここに、 $\Phi_0 = 2n \alpha_3 \tau_* (\tau_* - \tau_{*c})^{n-1}$ 、 $E = -(\lambda_1 (C_1 - C_2) + \lambda_2 (C_3 - C_4)) / (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)$

底泥擾乱の安定性は式 (35) の虚数部分 c_I の符号によって求められ、 $c_I < 0$ の時底泥擾乱は安定（マドリッブルは発生せず）であり、 $c_I > 0$ の時不安定（マドリッブルは発生する）となる。また、底泥擾乱の増幅率は $e^{k c_I t}$ であることから、マドリッブルの卓越波数は $k_* c_I$ を極大とする波数となる。

遅れ距離 δ^* は林・大西の砂粒子の解析を参考にして、

$$\delta_* = \alpha_3 (h_{mud} / h) F_r^2 \quad (36)$$

として解析を行なった。 n 、 α_2 、 α_4 は実験結果との整合性からそれぞれ $n=3$ 、 $\alpha_2=14.0$ 、 $\alpha_4=3.9$ とした。また、 $C_1 \sim C_4$ は $Fr^2 / Re \varepsilon$ によって求められるが、式 (8) から $Fr^2 / Re \varepsilon$ と τ_* との間には次の関係がある。

$$F_r^2 / Re \varepsilon = \alpha \phi_0 \tau_* \tau_{mud} / \rho g h \quad (37)$$

従って、理論的に τ_* の他に τ_{mud} (あるいは含水比) がパラメータとなっている。

6. 実験結果との比較

実験は、長さ 25 m、幅 30 cm、深さ 60 cm の二次元造波水槽を使用し、水槽の中央部に長さ 2.5 m、深さ 7 cm のトラップを設けその中に底泥を敷いて行なった。底泥として用いた試料は、ベントナイト（比重 2.60、中央粒径 $3.4 \mu\text{m}$ 、液性限界 160.2%、塑性限界 24.7%）であり、水深 20 cm 一定として入射波高と周期を変化させた。底泥の含水比は 230% ~ 162% で、せん断強度は τ_{mud}

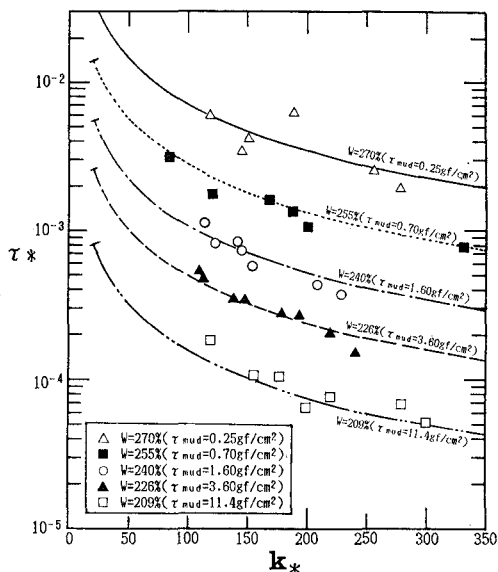


図-1 リップルの卓越波数と無次元せん断強度

$=0.24 \sim 42.0 \text{ gf/cm}^2$ ($23.5 \text{ Pa} \sim 4.12 \text{ kPa}$) であった。リップルの波長はビデオカメラの撮影記録より読み取った。

図-1 はリップルの卓越波数 k_* と無次元せん断強度 τ_* の関係を示したものである。図中、実線などで示される曲線は本理論による計算結果であり、水面波の碎波限界値で計算を打ち切っている。実験値に対する波のせん断応力 τ_{wave} は Jonsson の滑面乱流の摩擦係数を使用して計算し、無次元限界摩擦速度 τ_{*c} は実験結果より $\tau_{*c} = 3.0 \times 10^{-5}$ とした。

実験条件にもとづいて計算された卓越波数は理論式と良く一致していることがわかる。含水比の高い $W = 270\%$ の場合には実験値のバラツキは多くなるが、これは非常に軟らかい場合にはせん断強度の測定精度が若干低下することによるものと考えられる。図-2 は図-1 で示された結果の中の $\tau_{\text{mud}} = 3.60 \text{ gf/cm}^2$ (352.8 Pa) ($W = 226\%$) の場合について式 (35) より計算される安定・不安定境界と比較したものである。リップルは不安定領域内に発生していることが実験値からも確認される。

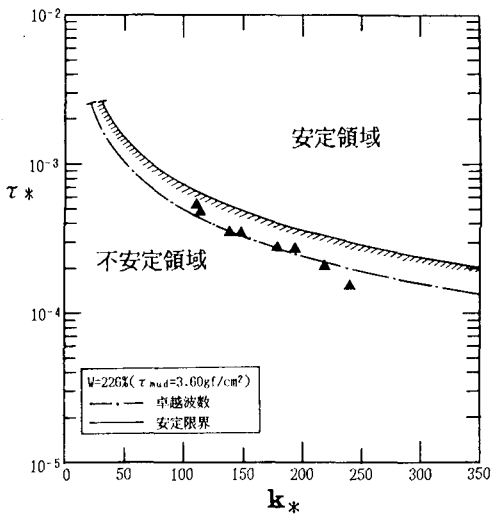


図-2 リップルの安定限界

7. むすび

以上の様に、軟らかい底泥上に発生するマッドリップルの安定性について検討を行なった。その結果、本研究で導入された無次元せん断強度により、マッドリップル

の卓越波数と安定領域を理論的に明らかにすることができたことによって、パラメーターの妥当性が確認された。従って、底泥の場合にも底泥のせん断強度によって従来の土質力学で粘性土として取扱われていると同様の設計方法が使用できると考えられる。

本研究の遂行に当たり、中央大学理工学部服部昌太郎教授より御指導を頂いた。また、(株) INA 新土木研究所大西光陽氏からは数多くの有益な御助言を頂いた。実験データの取得に当たっては、東亜建設工業技術研究所五明美智男氏の多大な協力を受けた。いずれも記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Brannon, J. M., Hoeppel, R. E. and Gunnison, D.: Efficiency of capping contaminated dredged material, *Dredging and dredged material disposal* (edited by Montgomery, R. L. and Leach, J. W.), ASCE, pp. 664~673, 1984.
- 2) Tavoraro, J. F. and Zammit, J.: Dredged material disposal management studies for the Port of New York and New Jersey, *Proceedings of the 12th U.S./Japan Experts Meeting on Management of Bottom Sediments Containing Toxic Substances*, 1986.
- 3) 矢内栄二・五明美智男: 軟らかい底泥のせん断強度特性について, 第43回土木学会年次学術講演会講演集II, pp. 768~769, 1988.
- 4) 大坪国順: 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所報告, No. 40, 1982.
- 5) 五明美智男・矢内栄二・堺和彦・大槻忠・糸列長敬: 波と底泥の相互干渉に及ぼす物性の影響について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 322~326, 1986.
- 6) 柴山知也・中西雅明・石原肇・佐藤慎司: 波による底泥の浮遊機構に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 271~275, 1987.
- 7) 中野晋・鶴谷広一・鷹濱潤: 波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 2, 1987.
- 8) Kennedy, J. F.: The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 16, Part 4, pp. 521~544, 1963.
- 9) Hayashi, T.: Formation of dunes and antidunes in open channels, *Proceedings of ASCE*, Vol. 96, No. HY2, pp. 431~439, 1970.
- 10) 中川博次・辻本哲郎: 砂礫の運動に伴う移動床砂面の擾乱発生過程, 土木学会論文報告集, 第291号, pp. 53~62, 1979.
- 11) 林泰造・大西光陽: せん断流モデルによる2次元河床波発生の理論的研究, 第25回水理講演会論文集, pp. 85~92, 1981.