

波による底泥の流動限界と巻き上げ限界

中野 晋*・伊東 信幸**・井上 洋***

1. はじめに

漂砂問題へのアプローチを行う上で外力を表すパラメータは普通、波による底面摩擦応力 τ_b を用いるため、底泥の舞い上がり量についても、これまでの研究では τ_b をパラメータとして議論されている。しかし必ずしも底泥床上での τ_b の評価法が確立されていないため、研究者によって τ_b の求め方は異なっている。つまり層流解、乱流波動境界層理論 (Jonsson, 1966)、波と底泥の相互干渉の理論 (Dalrymple・Liu, 1978 ほか) などの理論に基づく場合や固定床上での実測に基づく場合 (鶴谷ら, 1990) など研究者によってまちまちである。

波による底泥の移動現象では底泥層に波動運動が生じたり、底泥表面に生じたクラックから底泥波の決まった位相で巻き上げられることなどが観察されており、砂れきを対象とした漂砂問題ではあまり問題とならなかった底質の波動運動が舞い上がり機構に重要な役割を果たす。また波浪場における底質の液化化は底質内のせん断応力との関係で論じられており、底泥の場合にも流動限界は底泥内部の応力と密接な関連がある。以上のような背景のもとに本研究では底泥の舞い上がり現象が底泥波の挙動と密接に関わっており、これを抜きにしては議論できないこと、底泥運動や舞い上がり現象を記述するための応力パラメータとして底泥内部の最大せん断応力が適することを明らかにする。

2. 実験ケースと実験方法

2.1 実験水槽

実験には 図-1 に示す長さ 16.8m、幅 0.49m、高さ 0.75m の片面ガラス張りの廻流装置付 2 次元造波水槽を用いた。水路中央部にはアクリル板により長さ 1.8m (実験 1) あるいは 5m (実験 2, 3)、高さ 15.5cm の底泥床部を設けた。底泥床部の底面はアクリル板張りとし、底泥床部の沖側、岸側にはアクリル板製の水平な導流部を (長さ 1m) 設けた後、16/100 の勾配をつけて

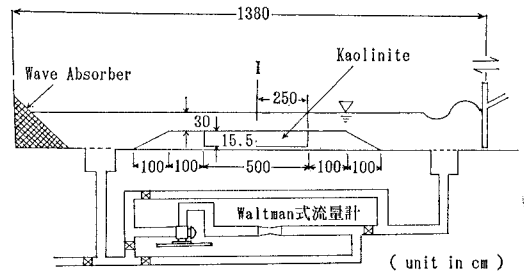


図-1 実験水槽の概略図

水路底面と接続した。水路下端には、反射波を小さくするためにステンレス製で内部にフィルムくずを詰めた透過型消波装置を、また造波機の後部にも消波材 (ステラシート) を設置し、反射波の影響を軽減させた。なお底泥には水道水を混合して所定の含水比に調整したカオリナイト (Engel Hard, ASP 600) を用いた。

2.2 実験方法

(1) 波による底泥の流動限界に関する実験 (実験 1)

底泥表面の上下運動つまり底泥波の発生が底泥の流動化を表す 1 つの指標であると考え、底泥波の発生限界を調べた。底泥床 (1.8m) の中央に超音波測深器 (正豊工学 MT-EPI-2) と容量式波高計を並べてセットし、波高と底泥表面の変動を測定した。底泥波の発生は超音波測深器の出力をペンレコーダに記録して確認するとともに目視でも底泥表面の状況を観察して判断した。

実験条件は底泥層の厚さを 3, 6, 9, 12 cm の 4 段階に変化させ、各底泥層厚について水深は 30 と 40 cm、周期は 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 秒の 4 種類、含水比は 119 ~ 136% の範囲で底泥波の発生が確認されるまで波高を増大させた。

(2) 波による底泥の巻き上げ実験 (実験 2)

波浪場での底泥の巻き上げ実験で SS 濃度の時間的な変化を調べる場合、採水場所によって濃度が異なることが実験上の問題点となる。そこで濃度の場所的変化を軽減するため、断面平均流速 4.4 ~ 4.9 cm/s の一様流 (波と同方向) を作用させて SS 濃度の時間変化を求めた。採水は 図-1 の I の位置に底泥床上 5, 10, 15, 20,

* 正 会 員 工 修 徳島大学講師 工学部建設工学科

** 正 会 員 工 修 静岡県土木部河川課

*** 学生会員 徳島大学大学院 工学研究科

25 cm に吸い出し孔のあるサイフォンを設置し、実験開始から 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120 分後の計 7 回行った。

台車に波の進行方向に 40 cm 離れた波高計 2 台と超音波測深器を取り付け、採水と採水の間に 25 cm ずつ移動させ、波高と底泥波高を測定した。波高計を 2 台用いたのは合田ら (1976) の方法で入射波分離計算を行い、反射波の影響を取り除いた波高を求めるためである。分離推定された入射波スペクトル E_I より、次式を用いて入射波高 H_I を求めた。

$$H_I = 2\sqrt{2} \left(\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} E_I(f) df \right)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

底泥床上では図-2 に示すように大きな波高減衰が生じるため、実験 2 の代表波高 H_S は底泥床部全体の入射波エネルギーの平均に対応する波高として次式で与えた。

$$H_S = \sqrt{\frac{1 - \exp(-2k_i L_m)}{2k_i L_m}} H_{I0} \dots\dots\dots (2)$$

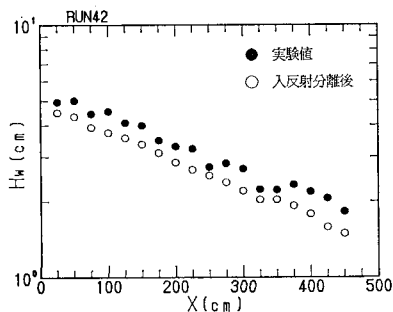


図-2 波高減衰の状況

表-1 巻き上げ実験の実験条件と結果

RUN	W (%)	U (cm/s)	H_{I0} (cm)	T (s)	$10^3 k_i$ (1/cm)	$10^6 P_0$ (kg/m ² /s)
04	128.6	4.60	4.19	1.00	0.628	1.51
05	126.0	4.88	5.13	1.01	0.707	2.99
06	125.6	4.38	4.64	1.21	0.491	3.22
07	125.2	4.66	4.06	1.21	0.644	2.61
20	135.8	4.58	4.75	1.01	0.613	2.96
21	140.1	4.88	3.77	1.00	0.948	1.67
22	141.9	4.66	4.69	1.20	0.807	6.92
23	141.9	4.37	4.29	1.19	0.874	3.33
30	154.5	4.69	4.75	1.20	1.79	11.1
31	157.9	4.88	4.12	1.20	1.90	3.99
32	156.6	4.37	4.68	1.01	1.98	4.76
33	155.6	4.58	3.80	0.99	1.85	2.33
40	169.2	4.58	5.24	1.00	2.71	3.54
41	170.3	4.88	3.87	1.00	2.08	1.72
42	168.2	4.66	4.82	1.20	2.49	8.33
43	170.4	4.37	4.08	1.20	2.45	4.43

ここに k_i は波高減衰係数, $L_m (=5 \text{ m})$ は底泥床長さ, H_{I0} は $x=0 \text{ m}$ での入射波高である。実験 2 の実験条件と結果を表-1 に示す。

(3) 底泥表面付近の速度変動の測定 (実験 3)

波高計, 超音波測深器, 電磁流速計 (計測技研 VM 201 H) を並べて, ほぼ同一の地点での水面変動, 底泥面変動と底泥床上 1~5 cm の流速変動を測定した。データ収録は A/D 変換ボードを増設したパソコンにより, 直接 A/D 変換してフロッピーディスクに記録した。

3. 実験結果と考察

3.1 波による底泥の流動限界

(1) 底泥内部の最大せん断応力

波によって底泥が流動するかどうかは底泥のもつ抵抗力と底泥内部に発生する応力の大小で決定される。

Yamamoto ら (1978) や Madsen (1978) は地盤を圧縮性流体で飽和した多孔質弾性体とみなして波浪場での海底地盤内の応力分布を求めているが, それによると地盤の厚さが無限で完全に飽和している場合にはいずれも有効応力が次式で近似できることを示した。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_v' &= P_0 k z e^{-kz} \cos(kx - \sigma t) \\ \sigma_h' &= -P_0 k z e^{-kz} \cos(kx - \sigma t) \\ \tau_{vh} &= P_0 k z e^{-kz} \sin(kx - \sigma t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで σ_v' , σ_h' , τ_{vh} はそれぞれ鉛直方向, 水平方向の有効応力とせん断応力, P_0 は海底表面での水圧振幅, k は波数, z は海底面からの深さ, σ は角周波数である。これより最大せん断応力 τ_m は

$$\tau_m = \sqrt{\left(\frac{\sigma_v' - \sigma_h'}{2} \right)^2 + \tau_{vh}^2} = P_0 k z e^{-kz} \dots\dots\dots (4)$$

で表され, 深さ z の位置では最大せん断応力値は時間によらず一定であることがわかる。この式で τ_m は $z=1/k$ で最大となり, 底質内での最大せん断応力値 $\tau_{\max}$ は

$$\tau_{\max} = e^{-1} P_0 \doteq 0.368 P_0 \dots\dots\dots (5)$$

で表される。海底地盤の厚さが有限の場合にも近似的にこれらの関係が成り立つと考え, その厚さ h_2 が $1/k$ より薄い場合には, $\tau_{\max}$ は

$$\tau_{\max} \doteq P_0 k h_2 \exp(-k h_2) \dots\dots\dots (6)$$

が成立する。

流動化の生じていない底泥にこの関係を適用するならば, 底泥層が流動化するかどうかは式 (5) あるいは式 (6) の $\tau_{\max}$ と底泥の降伏値 τ_y の関係から評価される。

図-3 は底泥層内の最大せん断応力値 $\tau_{\max}$ と底泥の降伏値 τ_y の比を底泥層厚の無次元量 kh_2 に対してプロットしたものである。なお実験範囲が $h_2 \leq 1/k$ であるので $\tau_{\max}$ の計算には式 (6) を用い, P_0 は直上の波高から微小振幅波理論を用いて換算した。また降伏値

は鶴谷ら(1986)の回転粘度計による測定値をもとにした

$$\tau_y = 1.494 \times 10^6 W^{-2.452} \text{ (Pa)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

の式から与えた。なおこの式で W (単位 %) は含水比である。図中の○印は底泥層の全面で底泥波の発生が確認されたケース、△印は一部で底泥の水平方向への運動が見られたものの超音波測深器で測定できるような上下運動は認められなかったケース、×印は底泥層の運動が全く見られなかったケースを表す。図から底泥運動が発生する限界の $\tau_{\max}/\tau_y$ は kh_2 が大きくなるにつれ、若干増加する傾向があるが、 $\tau_{\max}/\tau_y$ では底泥運動は生じず、底泥内部の最大せん断応力値が降伏値を越えてはじめて底泥の流動化が生じることがわかる。また実験時の観察によると底泥運動が生じていない場合には底泥粒子の舞い上がりは観察されていない。

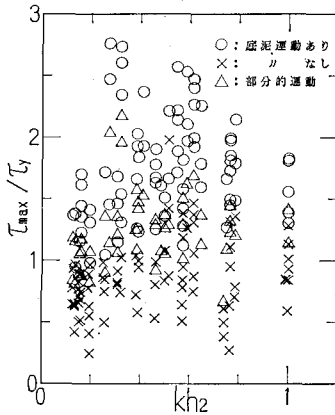


図-3 底泥の流動限界

3.2 底泥の巻き上げ限界

波による底泥の巻き上げ量を推定する上で巻き上げ限界の把握が重要であり、これまでも楠田ら(1988, 1989)、三村ら(1990)、鶴谷ら(1988, 1990 a, b)が調べている。これらの共通している点は底泥表面に作用するせん断応力を代表外力とする点と一方向流が作用する場合と波が作用する場合が比較されている点で、どの実験結果からも「波の場合の限界せん断応力 τ_c は流れの場合の τ_c よりも小さい」ことが示されている。特に鶴谷ら(1990 a, b)は底泥層が 0.5 cm と 9.0 cm の2種類の底泥上で波浪による巻き上げ実験を行い、底泥の波動運動が生じない場合には巻き上げ限界が一方向流れの場合とほとんど変わらないことや底泥の波動運動の発生が巻き上げ限界と深く関与していることを示した。さらに底泥内部の破壊と巻き上げとの関係についても言及している。

本研究でも鶴谷らの指摘と同様、波による底泥の巻き上げ現象は底泥の流動化や波動運動を切り放しては議論できないと考えて以下の考察を行った。

図-4 に浮遊底泥濃度の時間変化の1例を示す。この図からわかるように廻流させているため濃度は鉛直にはば一様となっている。この濃度分布から平均浮遊底泥濃度 C を求め、これに水路内総水量をかけた後、底泥床表面積で除して時刻 t までの底泥表面単位面積当りの飛び出し総量 P_t を求めた。 P_t の経時変化曲線の勾配から飛び出し率 P_s を求めた。

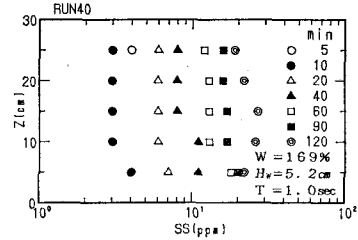


図-4 浮遊底泥濃度の時間変化

図-5 は飛び出し率 P_s と $\tau_{\max}/\tau_y$ との関係を表す。この図から P_s が 0 になる $\tau_{\max}/\tau_y$ を外挿して求め、巻き上げ限界 $\tau_{\max c}/\tau_y$ を評価した。なお本実験では流れが共存しているが、 $\tau_{\max}$ を計算する際には流れによる波長変化のみを考慮した。図-6 はこの実験と同じカオリナイトを用いている楠田ら(1988)、鶴谷ら(1988)、三村ら(1990)の実験結果もまとめて含水比と巻き上げ限界の関係を示したものである。彼らの実験条件を表-2 に示すが、底泥層厚 5.0~15.5 cm, 周期 0.8~1.3 秒, 断面平均流速 $U = -25 \sim 25$ cm/s とかなり異なる条件下でも巻き上げ限界がこの図で統一的に表示されることがわかる。図-7 は $\tau_{\max c}/\tau_y - 1$ を固体分率 S に対しプロットしたもので、固体分率が小さくなるほど、言い替えれば含水比が高くなるほど、降伏値に対する限界せん断応力 $\tau_{\max c}$ の比が大きくなることがわかる。これは高含水比の底泥では内部の応力はより等方的となり、弾性体として計算されるせん断応力値に比べると実際の値が小さいためではないかと考えられる。この図から波によ

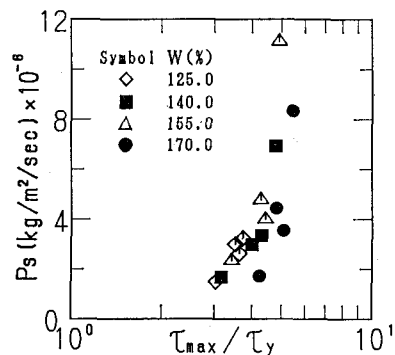


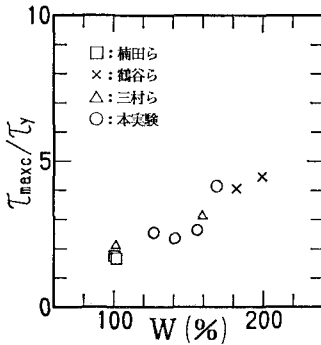
図-4 $\tau_{\max}/\tau_y$ と飛び出し率の関係

る巻き上げ限界が見かけの底泥内部の最大せん断応力 $\tau_{\max}$ を用いて表されることがわかる。また固体分率 S による内部の最大せん断応力の低減率を考慮した次式の実質最大せん断応力 $\tau_{\max}^*$ を用いれば波による底泥の巻き上げ限界は

$$\tau_{\max}^*/\tau_y \doteq 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau_{\max}^* = \tau_{\max} / (1 + 2.52 \times 10^{-2} S^{-2.68}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

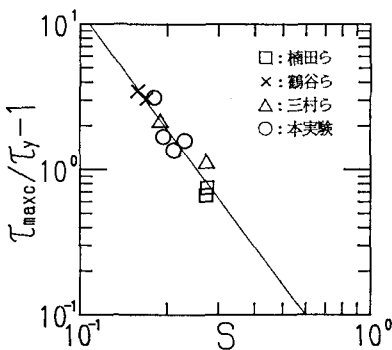
で表される。



図—6 巻き上げ限界と含水比

表—2 各研究者の実験条件

	水深 h_1 (cm)	底泥層厚 h_2 (cm)	断面平均流速 U (cm/s)	周期 T (s)
鶴谷ら	20	10	-25~25	0.8~1.2
楠田ら	26.7	5	0	1.0~1.4
三村ら	20, 30	10	0	0.87~1.3
本実験	30	15.5	3.8~5.2	1.0~1.2



図—7 巻き上げ限界と固体分率

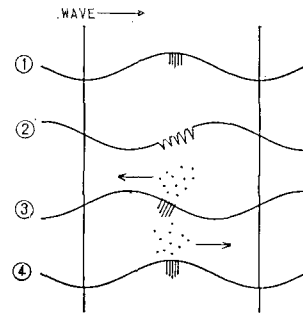
3.3 底泥波近傍の流体運動と巻き上げ機構

(1) 底泥の巻き上げ状況

底泥の舞い上がりの状況を観察した結果、底泥運動の結果生じた波峰線と平行に発生するクラックの間隙から底泥粒子が間欠的に放出されることがわかった。図—8はその代表的な状況を描いたものである。

まず①のように発生したクラックが、底泥の下降②とともに開き始める。その際に水がクラックに侵入するが、底泥の上昇時③にクラックが閉じるため、侵入水が底泥粒子とともに噴出する。この時、飛び出した底泥粒子は底泥表面に沿って一旦沖側に輸送された後、次の波の入射で岸向きに転じ、岸側上方へと拡散する。

この巻き上げの形態は巻き上げ現象のすべてを代表するものではないが、実験の範囲では底泥運動の大小に関わらず観察されている。



図—8 底泥粒子の飛び出し状況

(2) 底泥波近傍の流体運動

実験3では底泥床土1~5cmでの流速、水面波、底泥波を連続的に計測した。しかし底泥内部の流速は測定できないので間接的に底泥波の測定結果から次のように底泥表面粒子の流速変動を推定した。底泥表面変動 η_2 を

$$\eta_2 = a_2 \cos(kx - \sigma t + \phi) \quad \dots\dots\dots (10)$$

とする。ここで a_2 は底泥の振幅で ϕ は水面波との位相差である。底泥表面の鉛直流速 $\hat{w}$ は運動学的条件より

$$\hat{w}|_{z=h_2} = \frac{\partial \eta_2}{\partial t} = a_2 \sigma \cos\left(kx - \sigma t + \phi - \frac{\pi}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

で表される。また底泥波にも表面波と同様な微小振幅波理論を適用すると水平流速 $\hat{u}$ は

$$\hat{u}|_{z=h_2} = a_2 \sigma \coth kh_2 \cos(kx - \sigma t + \phi) \quad \dots\dots\dots (12)$$

で表される。このことを利用すると $\hat{u}$ は振幅が $\hat{w}$ の振幅の $\coth kh_2$ 倍であり、その位相は $\pi/2$ だけ遅れていることがわかる。 $\hat{w}$ は式 (11) より底泥波の時間微分波形から求められるので、2次多項式適合による平滑化微分法(南, 1986)により、底泥波の計測データから時間波形を求めた。水面波の収録データ(51.2 Hz, 4096 データ)について zero-down-cross 法により波を1波ごとに分離し、それぞれの波の1周期を50分割して位相平均した。同時測定した底泥波、底泥表面の鉛直流速についても水面波1波を基準として位相平均をとり、位相ごとの流体運動の特徴を調べた。

図—9, 10はこのようにして求めた底泥波付近の流体

運動のパターンを示したものである。なお、これらの図は視覚的にわかりやすいように時間波形を空間波形に置き換えて表示されている。実際には1波長の間に波高減衰があり、 x/L が大きいところでは運動が大きめに表示されている可能性があるが、巻き上げ現象と底泥波との定性的な関係をみる上ではあまり問題はないであろう。

底泥表面での水平流速は式(11)、(12)を用いて鉛直流速から計算した結果であり、クラックの挙動を観察した結果とよく一致し、底泥波の下降時にクラックが開き、上昇時に閉じる状況が示されている。底泥波直上の流速ベクトルの変化を見ると底泥粒子がクラックから飛び出す底泥波の上昇時には波の軌道流速は冲向きで、すぐ後に岸向きに転じており、底泥粒子が巻き上げた直後は底泥表面に沿って沖側に移動し、次の波が通過する際に岸側に運ばれるという観察結果をうまく説明できる。

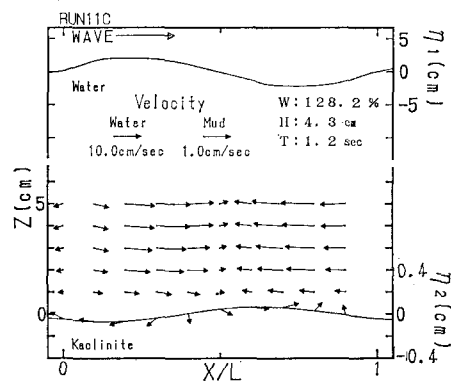


図-9 底泥近傍の流速ベクトル

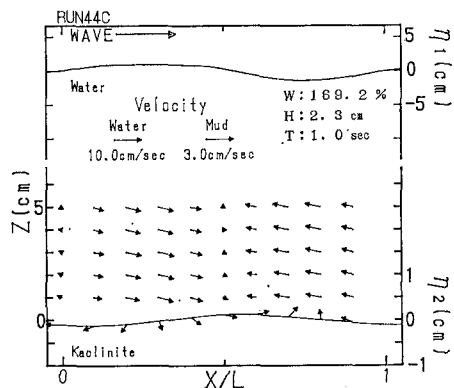


図-10 底泥近傍の流速ベクトル

4. おわりに

本研究では波による底泥の流動化と巻き上げ現象を底泥内部の最大せん断応力値と降伏値の関係に注目して調

べたものである。本研究で得られた結果を以下に述べる。

- 1) 波による底泥の流動化は底泥の降伏値 τ_y を越える底泥内部の最大せん断応力 τ_{max} が作用した時に生じる。
- 2) 波浪場では底泥の舞い上がり現象は底泥の波動運動と密接に関係しており、底泥が流動化して、波動運動が生じた後に巻き上げが生じることがわかった。また波による底泥の巻き上げ限界も間隙水の流動による最大せん断応力の低下を考えれば、底泥内部の最大せん断応力と降伏値の関係から評価できることがわかった。
- 3) 底泥波近傍の流体運動を測定した結果、波による巻き上げの代表的な形態が把握された。

最後に本研究を行うに際し、文部省科学研究費(総合研究(A), No. 01302046, 代表者 京都大学 中川博次, 試験研究(A), No. 01850125, 代表者 京都大学 中川博次)の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 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.
- 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, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 314-318.
- 合田良実・鈴木康正・菊池 治(1976): 不規則波実験における入反射波の分離推定法, 港研資料, No. 248, pp. 1-24.
- 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, 港研資料, No. 556, pp. 1-29.
- 鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤(1989): 流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 357-361.
- 鶴谷広一・江口秀二・佐々木豊貴(1990a): 流れおよび波による底泥の巻き上げ限界値の検討, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 235-239.
- 鶴谷広一・江口秀二・佐々木豊貴(1990b): 流れおよび波による底泥の巻き上げ限界, 港研資料, No. 674, pp. 1-13.
- 南 茂夫(1986): 科学計測のための波形データ処理, CQ出版, pp. 86-102.
- 三村信男・田口 智・加藤 始(1990): 底泥の波に対する応答と巻き上げ沈降フラックス, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 230-234.
- Dalrymple, A. R. and P. L.-F. Liu (1978): Waves over soft muds: a two-layer fluid model, Jour. Phys. Oceanography, Vol. 8, pp. 1121-1131.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layer sand friction factors, Proc. 10th Coastal Eng., ASCE, pp. 127-148.
- Madsen, O. S. (1978): Wave induced porepressures and effective stresses in a porous bed, Geotechnique, Vol. 28, No. 4, pp. 377-393.
- Yamamoto, T., H. L. K. H. Sellmeijer and E. V. Hijum (1978): On the response of a Poro-elastic bed to water waves, J. Fluid Mech., Vol. 87, part 1, pp. 193-203.