

ベーン試験とスランプ試験による底泥の流動限界値の検討

鶴谷 広一*・江口 秀二**・鷹濱 潤***

1. ま え が き

シルテーション (Siltation) とは、河川によって運ばれ海域に堆積した粘土やシルトなどの微細な粒子が、潮流や波により再び巻き上げられまたは流動して、航路や泊地に埋没する現象である。この微細な粒子は、帯電しているために海水の作用によって凝集沈殿し、堆積後圧密して密度や粘着力が変化するなど砂にはない複雑な性質を持っており、このことはシルテーションのメカニズムの解明を非常に困難にしている。しかし、わが国においても熊本港の建設が進む中でシルテーションの問題がクローズアップされ、その解明が急がれている。

本研究では、底泥の流動現象を考える上で重要である流動限界値について検討した。流動限界値は、流動に対する底泥の抵抗力で、通常降伏値と呼ばれている。底泥に作用する外力が降伏値以上になると底泥は流動し始めることから、この降伏値を求めることが流動現象を解明する上で非常に重要である。

粘土の降伏値を求めるには、主として回転粘度計が用いられている。大坪(1984)、鶴谷ら(1986)は、サーレ型2重円筒式回転粘度計を用いて、カオリナイトや現地泥などの流動特性を調べている。回転粘度計は流体の流動曲線を精度よく測定するには適しているが、試験をするにはある程度の経験が必要であり、また機械も高価であることなどから一般的な方法として普及していない。しかし、現在のところ回転粘度計に代わって降伏値を求める適当な方法がないため、これに頼らざるを得ないのが現状である。

一方、この降伏値は単に流動限界を表すだけではなく、底泥の巻き上げ現象を説明する際に用いられる巻き上げ限界値(限界掃流力)とも結び付けられている(大坪, 1984; 鶴谷ら, 1988)。このように降伏値はシルテーションの研究では不可欠なパラメータであり、これをより簡便に、かつ一般的な方法で求めることが望まれている。

本研究では、降伏値を測定する一般的な方法としてベーンせん断試験、スランプ試験を選んだ。ベーンせん断試験は、シルテーションの対象となる粘土の強度を測定するためによく用いられ(例えば永井ら, 1983)、またベーンせん断強度と限界掃流力の関係も調べられた(Kamphuisら, 1983)。スランプ試験は、フレッシュコンクリートの流動性(コンシステンシー)を調べる際に用いられる方法である。コンクリートの分野では、近年、スランプ値をレオロジー的視点から見直し、レオロジー定数とフレッシュコンクリートの性質を関係づける研究が行われ、降伏値とスランプ値はかなり良い相関を持つことなどが明らかになっている(例えば谷川ら, 1987, 海田ら, 1988)は粘土に対してスランプ試験を行い、粘土の含水比の調節や粘土の巻き上げの形態の整理をスランプ値で行った。

本研究では、まず回転粘度計を用いた実験を行い、粘土の流動曲線を調べ、これから粘土の降伏値を求めた。次にベーン試験とスランプ試験を行い、各試験で得られた結果と回転粘度計で得られた降伏値を比較することにより、各試験での降伏値の推定法について検討した。

2. 回転粘度計

(1) 実験方法

流体の流動特性は、流体内の速度勾配であるずり速度 D とせん断応力 τ の関係で決まり、この関係を図化したものが流動曲線である。回転粘度計はずり速度を連続的に変化させることにより、流体の流動曲線を求める装置である。

本研究では、鶴谷ら(1986)と同様にサーレ型二重円筒式回転粘度計を用い、ずり速度 (D) を 0 から 10s^{-1} まで上昇させ、再び 0 に戻す操作を三回繰り返して流動曲線を求めた。二回目と三回目の操作で得られる流動曲線はほぼ同じであり、一回目の流動曲線はこれとは異なることから、二回目と三回目のずり速度減少時の平均をその粘土の流動曲線とした。流動曲線は普通座標と両対数座標で表した。 D が 0 から 10s^{-1} までの全体的な挙動は普通座標で調べ、ずり速度が 0 付近の挙動は両対数座標で調べた。降伏値は $D=0$ でのせん断応力であるが、これ

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

*** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

を測定することはできないことから両対数座標でのせん断応力を降伏値とした。用いた粘土はカオリナイト、ベントナイト、熊本泥である。含水比の調整は、カオリナイトは水道水で、ベントナイトは水道水と塩水（比重1.03）で、熊本泥は塩水でそれぞれ行った。

(2) 流動曲線

図-1 は普通座標で示した流動曲線の代表的な例である。(A)はカオリナイトにみられる変化の形態である。低含水比では、ずり速度が大きくなるにしたがって流動しにくくなる現象 (shear thickening) がみられる。しかし高含水比になると、逆にずり速度が大きくなるにしたがって流動しやすくなる (shear thinning)。(B)は、ベントナイト+塩水と熊本泥に見られる変化の形態である。カオリナイトの場合と非常によく似ているが、高含水比ではずり速度がある値に達するとせん断応力は増加しない。これは、粘土内の応力がある一定値に達すると粘土は無限に流動する、つまり粘土の破壊を意味する。(C)は、ベントナイト+水の変化の形態である。他の三種の粘土とは異なり、すべての含水比について、ずり速度が大きくなるにしたがって流動しやすくなる現象がみられる。

図-2 は、各粘土の流動曲線を両対数表示したものである。各粘土の $D=0$ 付近の特徴を見ると、カオリナイ

ト、ベントナイト+塩水、熊本泥では、含水比の低い場合は $D=0$ 付近で流動曲線は傾きを持たないが、含水比が高くなると $D=0$ 付近で傾きを持つことがわかる。一方、ベントナイト+水ではほとんどの含水比に対して $D=0$ 付近で流動曲線は傾きを持っている。

粘土の抵抗力とずり速度の関係は次式で表される。

$$\tau = \tau_y + \mu D^n \dots\dots\dots (1)$$

ここで τ_y は降伏値、 μ は塑性粘度、 n は定数である。 τ_y は粘土の内部構造による抵抗力で、 D には無関係である。 μD^n は粘土の流動に対する粘性抵抗で、 D の大きさにより変化する。したがって、流動曲線が $D=0$ 付近で傾きを持たない場合は内部抵抗力が支配的で、このときの抵抗力は降伏値を表す。一方、傾きを持つ場合は粘性抵抗が無視できず、このときの抵抗力は降伏値と粘性抵抗の和で表される。今回求めた降伏値は $D=0.01\text{s}^{-1}$ のせん断応力であるが、 $D=0.01$ で曲線が傾きを持つ粘土については、求めた降伏値には粘性抵抗も含まれていると考えられる。

降伏値は、流動に対する粘土の抵抗力であることから粘土の強度と考えることができる。粘土の強度は乱された場合と乱されない場合とでは異なる。降伏値が乱された粘土の強度を表しているのか乱されない粘土の強度を表しているのかは、粘土が回転粘度計実験の最中にどの

ような操作を受けたかによる。本研究では、一回目の操作で得られた降伏値は乱されない粘土の強度に対応し、二回目と三回目の操作で得られた降伏値は既に一回目の操作を受けていることから乱された粘土の強度に対応すると考え、それぞれを τ_{y1} 、 τ_{y2} とした。

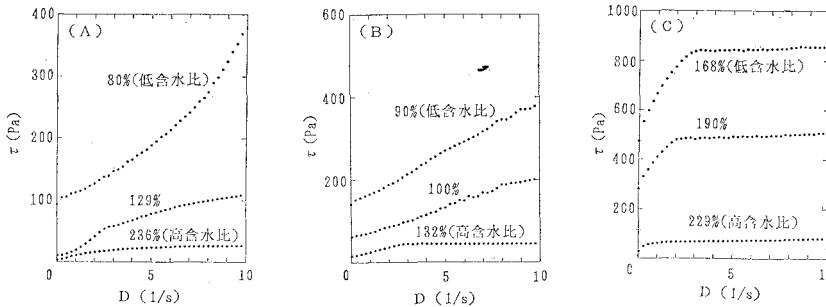


図-1 流動曲線 (普通座標)

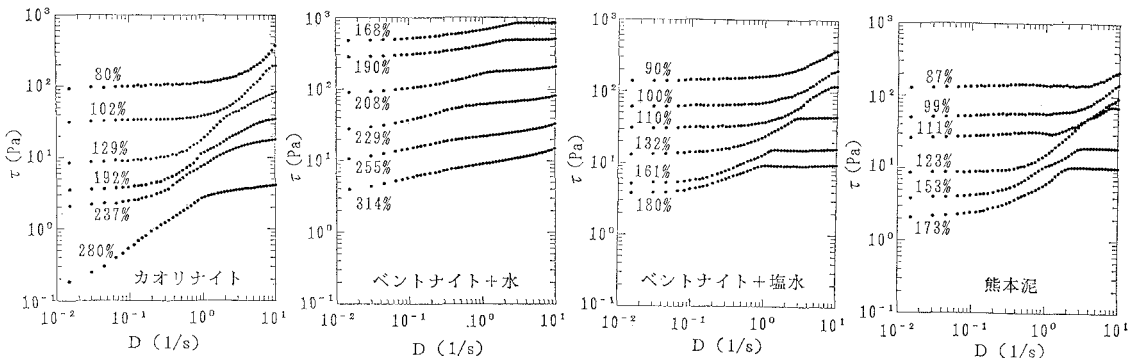


図-2 流動曲線 (両対数座標)

3. ベーン試験

(1) 応力一歪曲線

本研究で用いたベーンせん断試験機は、回転粘度計の内筒を高さ4 cm、幅2 cmのベーンに置き換えたものである。ベーンを角速度0.1度/sで回転させ、1回転(360度)するまでの回転角 θ と粘土内のせん断応力 τ の関係(応力一歪曲線)を調べた。

図-3(a)はカオリナイトの応力一歪曲線を示す。 τ は θ が5度から10度付近でピークを持ち、その後 θ の増加にともないゆるやかに減少して一定値に漸近する。ここで τ の最大値を最大せん断強度 τ_p 、 τ がほぼ一定値となった $\theta=360$ 度での値を残留強度 τ_r と呼ぶ。 τ_p 、 τ_r ともに含水比が高くなると小さくなる。しかし含水比が最も高いケースではピークはなくなり、 τ_p と τ_r はほぼ等しくなる。ベントナイト+塩水、熊本泥についても同様の応力一歪曲線が得られた。図-3(b)はベントナイト+水の応力一歪曲線を表す。他の三つの粘土とは異なり、含水比168%を除いて τ はピークをもたず、 θ が20度付近を越えると τ は一定値となる。

このように、ベーン試験で得られる応力一歪曲線は、ピークを持つ場合と持たない場合がある。この応力一歪曲線と両対数表示した流動曲線(図-2)を比較すると、ピークを持つ粘土の流動曲線はずり速度が0付近で傾きがないのに対し、ピークを持たない粘土の流動曲線はずり速度が0付近で傾きを持っている。つまりずり速度が0付近の粘土の抵抗力として、内部構造による抵抗が支配的であれば応力一歪曲線はピークを持ち、粘性抵抗が無視できなくなるとピークを持たない。

(2) ベーンせん断強度と降伏値

図-4は、乱された粘土の強度に対応する τ_{y2} と τ_r を比較したものである。 τ_{y2} が大きい領域では両者はほぼ

一致するが、 τ_{y2} が小さい領域では τ_r は τ_{y2} よりもかなり大きくなっている。(1)式に示すように粘土の抵抗力は降伏値と粘性抵抗の和で表されることから、ベーンせん断試験で得られた残留強度 τ_r が回転粘度計で得られた強度(降伏値) τ_{y2} よりも大きくなる理由は、 τ_r には粘性抵抗が含まれているからであると考えられる。この粘性抵抗の大きさがわかれば、 τ_r から降伏値を推定することができる。しかし、ベーンせん断試験で実際に生じているずり速度がわからないので、次のようにして粘性抵抗を推定し τ_r の補正を試みた。

図-2において粘性抵抗が無視できる場合には流動曲線は傾きを持たず、粘性抵抗が生じると曲線は傾きを持つ。この点から各粘土の強度に粘性抵抗が含まれ始めるずり速度を調べると、降伏値の大きい粘土では粘性抵抗が含まれるのは $D>1s^{-1}$ であるのに対し、降伏値の小さい粘土では $D<1$ で既に粘性抵抗が強度に含まれている。したがってベーンせん断試験で $D=1$ 程度のずり速度が生じているならば、降伏値の大きい粘土では $\tau_r=\tau_{y2}$ 、小さい粘土では $\tau_r>\tau_{y2}$ となり得る。そこでベーンせん断試験でのずり速度を $D=1$ とし、図-2から各粘土の各含水比に対する $D=1$ でのせん断強度 τ_{D1} を求める。 τ_{D1} は降伏値 τ_{y2} に $D=1$ での粘性抵抗を加えた全抵抗力である。 τ_{y2} を τ_{D1} で割りこの値を β とする。

$$\beta = \tau_{y2} / \tau_{D1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

β は $D=1$ での全抵抗力に対する降伏値の割合を表す。 τ_r が $D=1$ での全抵抗力を表しているとすれば、 τ_r に β を掛けた値は τ_r から推定される降伏値 τ_{ry} となる。

$$\tau_{ry} = \beta \times \tau_r \quad \dots\dots\dots (3)$$

図-5は回転粘度計で得られた降伏値 τ_{y2} と残留強度 τ_r から推定した降伏値 τ_{ry} を比較したものである。異なる含水比でも同一の降伏値が得られるなどの実験上のデータのばらつきを考えれば、 τ_{y2} と τ_{ry} はよく一致して

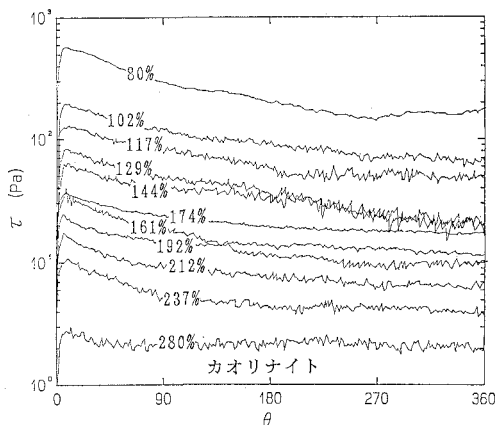


図-3(a) カオリナイトの応力一歪曲線

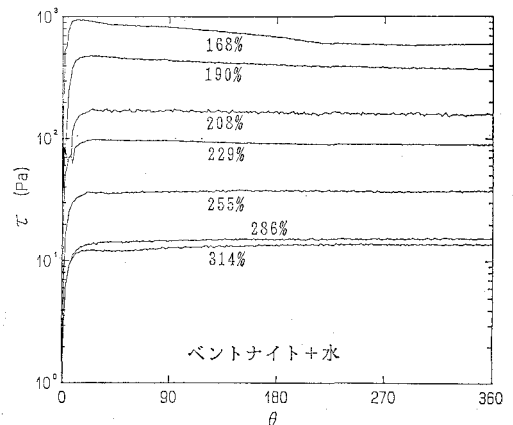


図-3(b) ベントナイト+水の応力一歪曲線

いる。このことから、ペーンせん断試験では回転速度が 0.1 度/s の場合には $D=1$ 程度のずり速度が生じており、このずり速度による粘性抵抗を考慮することにより残留強度から降伏値を推定することが可能であると言える。

4. スランプ試験

(1) スランプ値と含水比

実験に用いたスランプコーンの形状は高さ 10 cm、内径が上端で 9 cm、下端で 10 cm である。コーンの中に粘土を入れ、コーンを静かに抜きとったときの粘土の沈下量をスランプ値 s とした。図-6 は、各粘土の含水比とスランプ値を初期高さ（コーンの高さ） H で割った無次元スランプ値の関係を示す。スランプ試験が行える含水比の範囲は、カオリナイトで 80%~280%、ベントナイト+塩水で 80%~150%、ベントナイト+水で 180%~260%、熊本泥+塩水で 80%~220% である。このように粘土によって含水比の範囲は異なっている。また図中の●は、カオリナイトのスランプ試験を水中で行った結果である。空中でのスランプ値に比べると、水中でスランプ試験を行うことによりスランプ試験が可能な含水比の上限が 280% から 400% にまで上昇することがわかる。これは水中の浮力により粘土の重量を軽減できるからである。

(2) 降伏値とスランプ値

図-8 は、各粘土のスランプ値 s と回転粘度計から求めた降伏値 τ_{y2} の関係を示す。ここで降伏値は $\rho g H$ で、スランプ値は H でそれぞれ無次元化している。 ρ は各粘土の各含水比に対する密度で (4) 式で表される。式中の w は粘土の含水比、 ρ_w 、 ρ_s はそれぞれ水、土粒子の密

$$\rho = \frac{1 + \frac{w}{100}}{\frac{w}{100\rho_w} + \frac{1}{\rho_s}} \quad (4)$$

度である。また、水中でのスランプ値は水中重量で無次元化している。このように、降伏値を粘土の重量で無次

元化することにより、ベントナイト+水を除き、降伏値とスランプ値との間には粘土の種類によらない一定の関係が得られる。これは、粘土の種類が異なってもスランプ値が等しければ降伏値は等しいことを示している。ベントナイト+水では、同じスランプ値に対する降伏値が他の三種の粘土の降伏値よりも大きくなっている。これは前述のように降伏値に粘性抵抗が含まれているためである。

(3) 内部応力と降伏値

スランプ試験では、粘土に作用する外力は重力すなわち自重である。自重によって粘土内に生じた最大せん断応力が降伏値以上になると、粘土は流動し変形する。変形によって、粘土内の応力状態は変化し、最大せん断応力が降伏値より小さくなると変形は終了する。したがって変形後の最大せん断応力は、粘土内のどの位置でも降伏値であると考えてよく、変形後の応力状態がわかれば降伏値を推定できる。

変形後の粘土内部の応力状態は次のようにして求めた。図-7 に示すように、変形後の粘土の底面中央から半径方向に X 軸、鉛直上向きに Z 軸をとる。 $Z=z$ で水平に切った面 (z 面) の直径を $a(z)$ とし、変形後の粘土の高さを h とする。応力計算を簡単にするために、 z 面に作用する直応力 σ_z は z 面より上にある粘土の重量を z 面の面積で割った値とする。 z 面上に微小エレメントを考えると、上の仮定から σ_z 、 σ_x が直応力となる。ここで $\sigma_x = k\sigma_z$ と表すと、エレメント内の最大せん断応力 $\tau_{\max}$ は次のようになる。

$$\tau_{\max} = 1/2 (\sigma_z - \sigma_x) \quad (5)$$

$$= \alpha \sigma_z$$

$$\alpha = 1/2 (1 - k) \quad (6)$$

となる。 k は物質によって異なる定数で、流体の場合は 1、土では静止土圧係数で 0.5 である。本研究で用いた粘土の k の値はわからないことから、これを変数とした。 $\tau_{\max}$ は降伏値に等しく一定であることから、直応力 σ_z も粘土内で一定値 σ_0 となる。この条件から変形後の粘

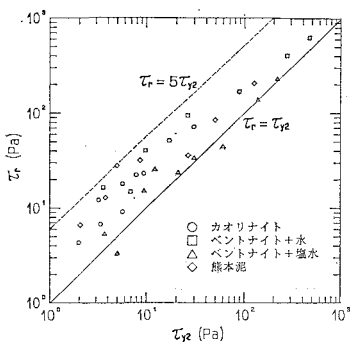


図-4 τ_y と τ_{y2} の関係

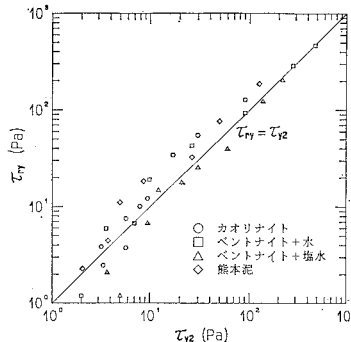


図-5 τ_{y2} と τ_{ry} の関係

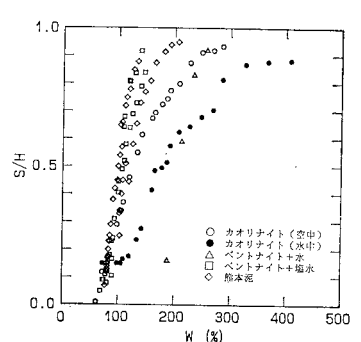


図-6 含水比とスランプ値

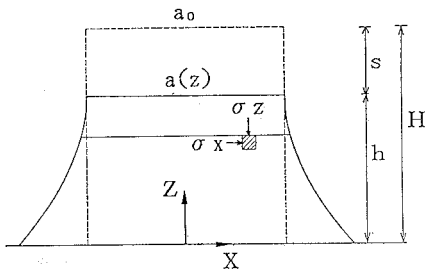


図-7 内部応力の算定

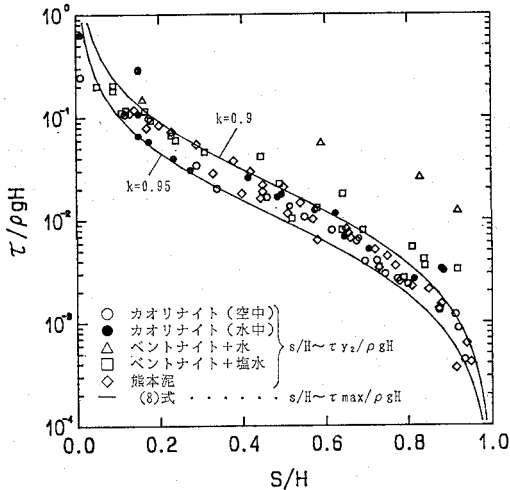


図-8 スランプ値と降伏値

土の形状は次式で表される。

$$a(z) = a_0 \exp\left\{-\frac{\rho g}{2\sigma_c}(h-z)\right\} \dots\dots\dots (7)$$

a_0 はコーン上端面の直径である。(7)式から変形後の粘土の体積が求められる。変形前と変形後の体積は等しいことからスランプ値 s と粘土内の最大せん断応力 $\tau_{\max}$ の関係は次のようになる。

$$\exp\left(-\frac{s}{H}\right) = \frac{1}{2.72} \left(\frac{\alpha \rho g H}{\tau_{\max}} + 1 \right)^{\frac{\tau_{\max}}{\alpha \rho g H}} \dots (8)$$

ここで $\tau_{\max}/\rho g H$ はせん断応力の無次元量、 s/H はスランプ値の無次元量である。図-8 に示した曲線は、 k を変数として (8) 式を表したものである。 $k=0.9\sim 0.95$

とすれば、 τ_{axm} は実験から得られる降伏値 τ_{y2} とよく一致していることがわかる。したがって、(8) 式を用いることにより、スランプ試験から降伏値を推定することができる。

5. 結 論

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

(1) ベーン試験で得られる応力-歪曲線は、粘土の種類や含水比の違いにより、ピークを持つ場合と持たない場合に分かれた。応力-歪曲線と流動曲線と比較した結果、ずり速度が 0 付近の抵抗力として、内部構造による抵抗が支配的である場合には応力-歪曲線はピークを持ち、粘性抵抗が無視できない場合にはピークを持たないことが明らかになった。また、残留強度 τ_r から推定した降伏値 τ_{ry} は回転粘度計で得られた τ_{y2} とよく一致した。

(2) 無次元化した降伏値とスランプ値の間には、粘土の種類にかかわらず一定の関係があることがわかった。変形後の粘土内の最大せん断応力とスランプ値の関係式は実験結果とよく一致することから、この関係式を用いてスランプ値から降伏値が求められることを示した。

謝辞：本研究を進めるにあたり、当研究所土質部の善功企動土質研究室長および土田 孝主任研究官にはベーン試験について有益な助言をうけた。ここに記して感謝します。

参 考 文 献

- 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，土木学会論文集，第 393 号/II-9，pp. 33~42.
- 大坪国順 (1984)： 底泥の再浮上機構に関する基礎的研究，京都大学学位論文，138 p.
- 谷川恭雄・森 博嗣 (1987)： フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価法—スランプ値から何がわかるか—，コンクリート工学，Vol. 25，No. 5，pp. 4~16，May.
- 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. 566，29 p.
- 鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤 (1988)： 流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究，第 35 回海岸工学講演会論文集，pp. 357~361.
- 永井紀彦・山本督夫・L. Figueroa (1983)： 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.
- Kamphuis, J. W. and K. R. Hall (1983)： Cohesive Material Erosion by Unidirectional Current, Proc. ASCE, Vol. 109, No. HY 1, pp. 49~61.