

# 波浪作用下における底泥の圧密挙動に関する実験的研究

## Experimental Study on Consolidation of Bottom Mud under Wave Action

熊谷隆宏<sup>1</sup>・土田 孝<sup>2</sup>・安部太紀<sup>3</sup>・菊原紀子<sup>4</sup>

Takahiro KUMAGAI, Takashi TSUCHIDA, Taiki ABE and Noriko KIKUHARA

In the case where soft bottom mud with high water content over the liquid limit is fluidized by wave-induced pressure, cracks are generated in the surface of the mud. Focusing on the generation of cracks in the mud, a laboratory experiment on the consolidation of soft mud under wave action has been conducted. The characteristics of development of cracks to deeper area are investigated in terms of wave height and occurrence global slip-failure in the mud layer. It is elucidated that consolidation of soft mud is promoted remarkably under wave action because excess pore-water pressure tends to be accumulated around the tips of cracks by wave-induced repetitive shear stress and the pressure dissipates promptly by the drain effect of cracks. Also, the washout of fine particles from deep area of mud has been examined.

### 1. はじめに

河川から河口域に運搬され、フロック（凝集体）を形成して沈降・堆積したシルトや粘土の微細粒子は、静穏時に沈降・堆積が進行する一方、波や流れの攪乱作用時には、巻き上がり、浮遊移動する。海底面を強く攪乱する高波浪の発生が少ない閉鎖性水域では、巻き上がる量に比べて沈降する量が大きく、海底に高含水比の底泥が堆積していくとともに、波や流れの作用、塩分濃度・水温の変化、生物遺骸の沈殿など各種の複雑な環境の影響の下で、長期的に圧密されて地盤が形成される。

波による底泥の巻き上げ特性の解明に向けて、例えば、三村ら（1989, 1990）は、カオリン泥とベントナイト泥について、含水比が液性限界以上にある場合の底面せん断応力と巻き上げ・沈降フラックスの関係を調査し、各底泥グループに対して、巻き上げフラックスの評価式を提案している。また、土田・五明（1999）は、波浪作用に対して底泥が安定する条件を地盤の安定解析の手法を用いて誘導するとともに、底泥の圧密に関する水理実験を行い、波の作用により底泥層が亀裂の発生を伴いながら流動化する場合に、底泥層内で局所的に含水比が大きく低下する特性が現れることを示している。さらに、熊谷ら（2007）は、底泥の流動化に伴う亀裂の発生に着目し、スメクタイトを含む底泥では、亀裂周囲の粘土部は性状を保持しながら、亀裂が深度方向に発達していく傾向のある延性的な破壊形態が現れることを示すとともに、亀裂が有する排水促進効果（ドレーン効果）により

底泥の圧密が促進される特性を明らかにしている。

本研究では、波浪作用によって底泥に亀裂が発生する条件に関して詳細な実験を行い、亀裂の発達特性を調べるとともに、底泥内における過剰間隙水圧の応答および含水比の変化特性、底泥粒子の粗粒化特性を明らかにすることにより、波浪作用下における底泥の圧密挙動を解明することを目的とする。

### 2. 実験の概要

実験に用いる底泥試料として、徳山港の浚渫粘土を用いた。ただし、実験では、小石や貝殻等を取り除いた後、人工海水を用いて初期含水比を液性限界の1.5倍に相当する165%に調整して用いた。このときの底泥の密度は1,300kg/m<sup>3</sup>であり、実海域において表層に堆積し、自重圧密過程にある高含水比の底泥の状態を想定している。実験に用いた底泥粘土の主な物性値を表-1に示すとともに、図-1および図-2に、標準圧密試験より得られた圧密特性を示す。さらに、ハンドペーン試験によって得られた含水比とせん断強度の関係を図-3に示す。

波の作用下における底泥の圧密挙動を調べるために、長さ10m、幅0.3m、高さ0.4mの造波機能を持つ水槽に長さ1.0m、深さ0.3mの土槽を取り付けた実験装置を用いた

表-1 粘土物性値

土粒子密度 $\rho_s$		2620kg/m <sup>3</sup>
粒度組成	砂分	4.5%
	シルト分	46.0%
	粘土分	49.5%
コンシステンシー	液性限界 $w_L$	110.6%
	塑性限界 $w_P$	40.0%
	塑性指数 $I_p$	70.6

1 正会員 Ph.D. 五洋建設（株）技術研究所  
2 正会員 工博 広島大学大学院工学研究科教授  
3 学生会員 広島大学大学院工学研究科  
4 正会員 修（環） 五洋建設（株）技術研究所

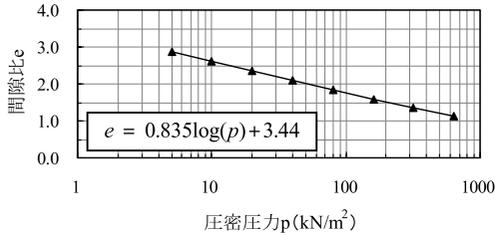


図-1 粘土の  $e - \log p$  関係

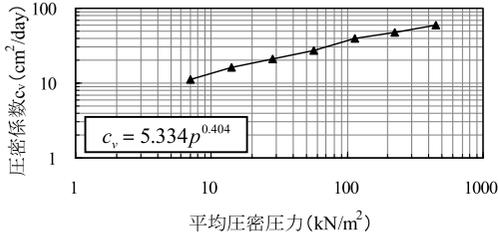


図-2 粘土の  $c_v - p$  関係

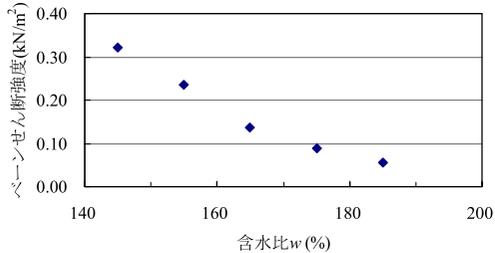


図-3 粘土の含水比-せん断強度特性

(図-4)．波浪条件として、水深を0.15mに設定し、波形勾配が0.03程度となるように、波高0.04m、周期1.2s (Case1) および波高0.05m、周期1.4s (Case2) の規則波条件を選定し、72時間にわたる波浪作用下の底泥圧密実験を行った．実験期間中、図-4に示すように、土槽沖側端から0.3mの位置において、底面から0.075m、0.150m、0.225mの高さで間隙水圧変動を計測した．また、波浪作用の有無による圧密特性の違いを調査するため、直径0.3mのアクリル円筒を用いて、静水条件下の圧密実験を併せて実施した．

### 3. 底泥の挙動および亀裂特性

実験で作用させる波浪条件に対して、底泥が不安定になり、流動化が発生する限界せん断強度を土田・五明(1999)の手法に基づいて評価すると、波高0.04m時には0.86kN/m<sup>2</sup>、また波高0.05m時には1.03kN/m<sup>2</sup>となる．一方、実験に用いた底泥の初期せん断強度は0.14kN/m<sup>2</sup>であり、限界せん断強度に比べて十分に小さく、底泥の流動化が大きく発生する条件であった．

実験において、底泥は波浪作用により直ちに流動化し、

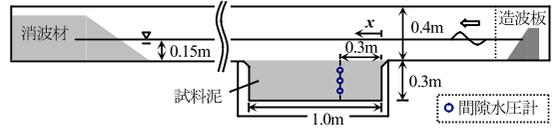


図-4 実験装置概要



(1) Case1 (波高0.04m)



(2) Case2 (波高0.05m)

写真-1 底泥の亀裂部から抽出した石膏の例

底泥表面が上昇・下降を周期的に繰り返す波動運動が現れるとともに、波峰線と平行に亀裂が発生することが確認された．

また、熊谷ら(2007)と同様の方法により、波浪作用開始から5分経過後の状態において、亀裂内に石膏スラリーを注入して亀裂深度の調査を行った．注入後、固化した石膏片を抽出した例を写真-1に示すように、底泥表面から視認することができない亀裂の深さは、抽出した石膏片より推測することができる．波高が0.04mの条件では、亀裂深さが0.015m程度で比較的浅いのに対し、波高が0.05mの条件では0.06m程度の深い亀裂が生じていることが考えられる．

また、底泥表面から発達する亀裂とは別に、6時間程度経過した後には、空間分布を持ち偏差荷重として作用する底面波圧によって、底泥層内に大きなすべりが生じていることが観察された．すべり面によって底泥の挙動は分断され、流動化挙動は、すべり面の上部においてのみ現れた．波高0.05m作用時に現れたすべり面を写真-2に示すように、比重の異なる細かい貝殻片がすべり面に集積していることから、すべり面を挟んで底泥の挙動が異なることがわかる．

波浪作用下における底泥粒子の挙動として、底泥面に作用する波のせん断応力により巻き上げられるとともに、自重によって沈降する現象が現れる．Odd・Cooper

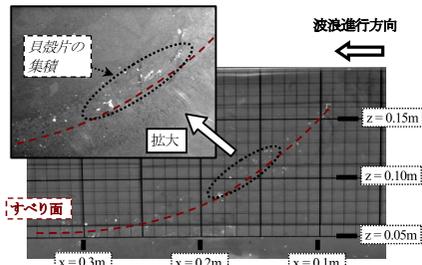


写真-2 底泥層内に現れたすべり面 (Case2)

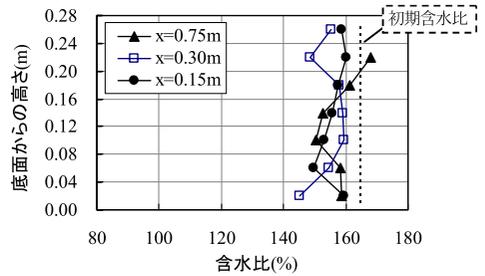
(1989) や鶴谷ら (1994) は、沈降・堆積した軟弱な層のうち、非ニュートン流体的な挙動を示す高濃度な流動層を Fluid mud とし、その下の自重圧密過程にある層を Consolidating bed と区別している。

本研究の実験において、巻き上げられた後に沈降した底泥粒子が Fluid mud 層を形成することが観察された。Case2 の条件において、Fluid mud の層厚は 5cm 程度であり、表層部 1cm における密度は  $1,020\text{kg/m}^3$ 、また、下層部 1cm では  $1,130\text{kg/m}^3$  であった。Fluid mud の下層では密度が高くなっており、Fluid mud が Consolidation bed に移行していく過程がわかる。

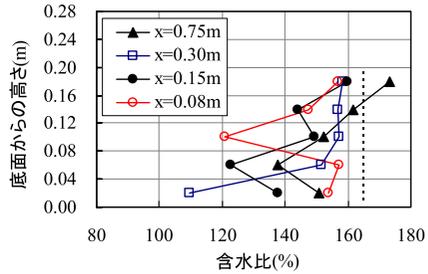
#### 4. 底泥の含水比変化特性

72 時間にわたる波浪作用下の底泥圧密実験における実験後の含水比の深度分布を図-5 に示す。ここでは、Fluid mud を除く底泥を調査対象として、土槽沖側端から、0.08m、0.15m、0.30m、0.75m の位置で含水比の変化を調査した。特に、前節の調査より底泥内に亀裂が深く形成されていると推定される Case2 において、土田・五明 (1999) や土田ら (2005) の研究と同様に、特定の深度で含水比が著しく低下する現象が現れている。このような含水比の著しい低下が現れる深度は、排水促進効果を持つ亀裂の先端深度に概ね一致することが、熊谷ら (2007) によって明らかにされている。さらに、本研究では、図-6 に示すように、含水比が最も低下した深度と底泥層内のすべり面の形成位置の比較を行い、含水比の著しい低下が現れる深度は、すべり面が形成される深度にも概ね一致することを明らかにした。すなわち、この結果は、深さ方向への亀裂の発達は、底泥層のすべりにより制限されることを示唆するものである。

波浪作用条件下の圧密特性と比較するために、静水条件下における自重圧密実験結果、および図-1 の圧密試験結果より評価される自重圧密完了時の含水比分布を図-7 に示す。ドレーン等による排水促進を行わず、底泥表面のみを排水境界とする条件では、図-2 の圧密特性より、圧密が完了するまでに 50 日程度の期間が必要であると評価される。また、静水時の自重圧密では、含水比の低下



(1) Case1 (波高 0.04m)



(2) Case2 (波高 0.05m)

図-5 実験終了時 (72 時間後) の含水比分布

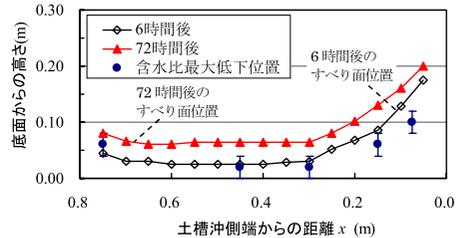


図-6 すべり面形成位置と含水比が最も低下した深度の比較 (Case2)

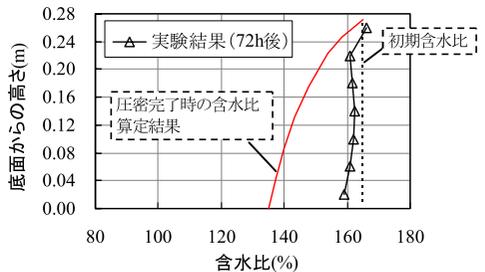


図-7 静水条件下の自重圧密による含水比変化

は 135% 程度が限界であることがわかる。波浪の作用により亀裂が深く形成された Case2 の実験後の含水比は、最大で 110% 程度と大きく低下しており、既往の研究で報告されている亀裂の排水促進効果 (ドレーン効果) だけでは説明できない圧密挙動が現れていることがわかる。

土槽沖側端から 0.30m 離れた位置における底泥内の過剰間隙水圧について、Case2 の計測結果例を図-8 に示す。間隙水圧の基準として、波浪を作用させる直前の静水条

件においてゼロの値に設定した。また、図中の値は、150波程度の波浪が作用する180秒間の移動平均値を示すものである。底面から0.075m, 0.150m, 0.225mの高さで計測した過剰間隙水圧のうち、特に、含水比の著しい低下が現れる位置の周辺にあたる0.150mの高さにおいて、顕著な過剰間隙水圧の蓄積と消散が繰り返し生じていることがわかる。

亀裂周辺における過剰間隙水圧の挙動について、熊谷(2009)の弾塑性構成則に基づく地盤FEMモデルと数値波動水路の連成モデルを用いて検討する。解析では、長さ1.0m、深さ0.3mの土槽に底泥が投入されている状態をモデル化する。また、底泥内の亀裂に関しては、土槽中央部に、厚さ5mm、深さ0.15mの亀裂が初期条件として形成されている簡易な状態でモデル化する。また、実験で用いた165%の高含水比で非常に軟弱な底泥を表現する物性値の一覧を表-2に示す。

Case2の波浪条件に対して、波浪作用下の底泥挙動を解析した結果、図-9に示すように、亀裂の先端部周辺において、せん断応力と過剰間隙水圧が大きく発生しやすい傾向があることが明らかになった。すなわち、実験において現れた底泥内の過剰間隙水圧の著しい蓄積は、底泥内に亀裂が形成されていることに起因すると考えられる。また、亀裂が形成されている条件では、波浪の繰り返しせん断作用により亀裂先端部の周辺で過剰間隙水圧が蓄積される過程と、亀裂の排水促進効果によって過剰間隙水圧が消散する過程が繰り返される中で、静水条件下の自重圧密以上に圧密が促進されると考えられる。

なお、波浪が軟弱な底泥上を進行するとき、底面作用圧が底泥運動を引き起こすため、波のエネルギーが減衰する。波浪が進行とともに減衰していくことにより、底泥の流動化や亀裂の形成が小さくなるため、岸側にある $x = 0.75m$ の地点においては、図-5において確認されるように、沖側の地点に比べて圧密の促進が小さく、含水比

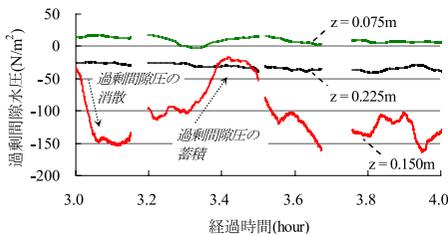


図-8 過剰間隙水圧 (180s 移動平均値) の時間変化例 (Case2)

表-2 VOF-弾塑性FEM連成解析で与える底泥の物性値

弾性係数 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン 比 $\nu$	水の体積 圧縮率 $\beta$ (kN/m <sup>2</sup> )	透水係数 $k$ (cm/s)	粘着力 $c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
30.0	0.48	$5.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^{-7}$	0.14	1300

の低下量が小さいと考えられる。

### 5. 底泥の粗粒化特性及び巻き上げフラックス

波浪作用下の実験終了後、著しい含水比の低下が現れた $x = 0.30m$ 地点、岸側にあり含水比の低下が小さい $x = 0.75m$ 地点、およびFluid mud内を対象にして、底泥の粒度変化に関する調査を行った。Case2における実験後の底泥の粒度分析結果を図-10に示す。

著しく含水比が低下し、深い亀裂が形成されていたと考えられる $x = 0.3m$ 地点では、最深部から2~10 $\mu m$ のシルト分粒子が10%程度流失していることが確認される一方、Fluid mudの表層部では、2~10 $\mu m$ の成分が増加していることがわかる。また、含水比の低下が小さく有意な亀裂が形成されていないと考えられる $x = 0.75m$ 地点では、有意な粒度変化は現れていない。すなわち、底泥の粗粒化には亀裂の形成が深く関係し、水みちとなる亀裂を通して底泥内の深部から流失した細粒分はFluid mudの表面に達し、最終的には波浪による巻き上げにより流失すると考えられる。

また、Case2の実験終了後、底泥の巻き上げフラックスを調査するために、水中に浮遊する底泥粒子、Fluid mudおよび土槽の外に沈殿・堆積している底泥を回収した。回収した底泥粒子の乾燥重量より、初期の底泥条件に対応する流失量を算定し、実験期間中における平均の巻き上げフラックスを評価すると、 $1.3 \times 10^{-4} \text{kg/m}^2/\text{s}$ であ

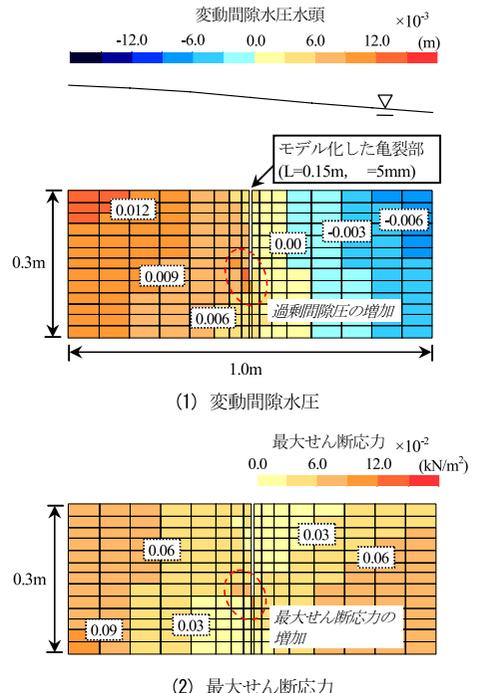


図-9 波浪作用下における底泥挙動の解析結果例

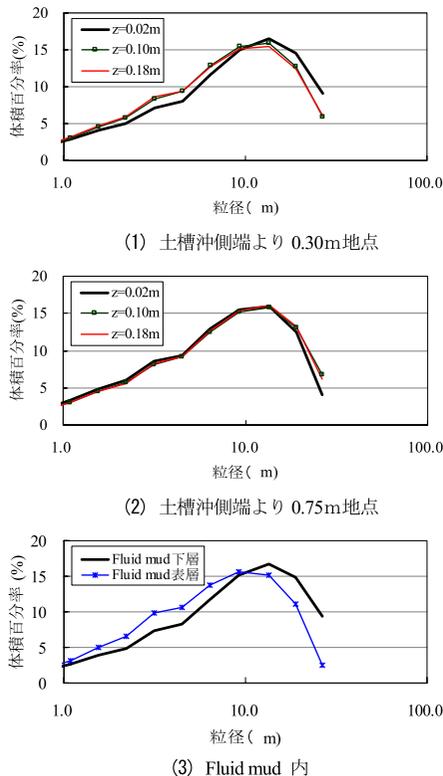


図-10 実験後の底泥に対する粒度分析結果 (Case2)

ることがわかった。

三村ら (1989, 1990) は、底泥を第一底泥グループ (カオリン, 現地泥) と第二底泥グループ (ベントナイト) に分類し、波による底面せん断応力と底泥の限界せん断応力に着目して、各グループの巻き上げフラックスを評価している。底泥のグループに関して、本研究で用いる底泥は、港湾の浚渫粘土であり、第一底泥グループに分類されると考えられる。また、Case2の波浪条件では、外力として作用する底面せん断応力  $\tau_m$  は  $0.38\text{N/m}^2$  であり、三村ら (1990) の研究で評価されている第一グループ (現地泥) の巻き上げフラックスのうち、本研究の実験条件に対応する値は、 $1.0 \times 10^{-4} \sim 8.0 \times 10^{-4} \text{kg/m}^2/\text{s}$  程度である。すなわち、本研究の実験における巻き上げフラックスは、既往の研究で報告されているものと、同程度の量であることがわかる。

また、本研究で調査した巻き上げフラックスを用いると、72時間後の実験終了時における底泥の侵食深さは、 $0.063\text{m}$  と算定できる。実験終了時の底泥面は、初期底泥面から  $0.07\text{m}$  程度低下した位置にあることが確認されており、底泥に深い亀裂が形成されるような外力が作用している条件下では、圧密による沈下量に比べて、巻き上げによる侵食量が大きいことがわかる。

## 6. おわりに

海底面を強く攪乱する高波浪の発生が少ない閉鎖性水域では、海底に堆積した底泥は、波や流れの作用、塩分濃度・水温の変化、生物遺骸の沈殿など各種の複雑な環境の影響の下で、圧密されて地盤が形成される。本研究では、地盤の形成に対する影響因子のうち、波浪に着目して、波浪作用下における底泥の圧密挙動を解明することを目的として実験を行った。

実験では、特に、底泥の流動化や波動運動に伴って、底泥内に形成される亀裂に着目した。

実験の結果、亀裂の発達特性や底泥の圧密特性に対して、波浪の大きさだけでなく、底泥層内に発生するすべりが影響を与えることを明らかにした。また、底泥内の過剰間隙水圧挙動を調べるとともに、数値解析による検討を行い、波浪の繰り返しせん断作用により亀裂先端部の周辺で過剰間隙水圧が蓄積される過程と、亀裂の排水促進効果によって過剰間隙水圧が消散する過程が繰り返される中で、静水条件下の自重圧密以上に圧密が促進されることを明らかにした。

本実験では、底泥が堆積した後の時間経過が少ない状態を想定し、初期含水比を一定にした条件で実験を行ったが、実際の地盤の形成過程を考えた場合、自重圧密が進行した後に、波浪が作用することがあると考えられる。自重圧密が進行し、含水比が鉛直分布を持つ条件を含めて検討することが、今後の課題として重要であると考えられる。

## 参考文献

- 熊谷隆宏・土田 孝・大坪政美・渡部要一・五明美智男・塩田耕司 (2007) : 波浪作用下における底泥表層の圧密促進メカニズム, 地盤工学ジャーナル, Vol. 2, No. 3, pp.223-235.
- 熊谷隆宏 (2009) : VOF - 弾塑性 FEM 連成モデルによる基礎地盤および構造物の変形解析と破壊メカニズムに関する考察, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp. 871-875.
- 土田 孝・熊谷隆宏・池野勝哉・渡部要一・五明美智男 (2005) : 波浪作用下の底泥の挙動に関する解析手法について, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 451-455.
- 土田 孝・五明美智男 (1999) : 波による水圧変動に対する底泥層の安定について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 596-600.
- 鶴谷広一・村上和男・入江功・笹嶋 博・糸井正夫 (1994) : Fluid Mud を考慮した 3 次元シミュレーション予測モデルについて, 海岸工学論文集, Vol. 41, pp. 1011-1015.
- 三村信男・田口 智・加藤 始 (1989) : 波による底泥の巻き上げ・沈降フラックス, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 309-313.
- 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.
- Odd, N. V. M. and Cooper, A. J. (1989): A Two-dimensional model of the movement of Fluid Mud in a high energy turbid estuary, J. of Coastal Res., Special Issue No.5, High Concentration Cohesive Sediment Transport, pp. 185-193.