

種々の断面形状の潜堤構造物による航路埋没阻止機能 に関する研究

森本剣太郎*・入江 功**・小野 信幸***
竹内伸夫****・Rahman Hidayat*・箕作幸治*****

1. はじめに

波や流れにより泥土が航路泊地に埋没するシルテーション問題は、わが国を始め多くの途上国において円滑な港湾運営に支障をきたしている。泥土の埋没は、掃流・浮遊機構で移動堆積する砂の場合と異なって、一旦荒天時の外力によりせん断され浮遊した泥土が時化が去るにつれ沈降して、fluid mud (高濃度浮泥層) を形成し、これが航路泊地の深みに流入することにより発生する。このため熊本港では、fluid mud を潜堤等により堰止めることが埋没対策として有効であることが確認されている。しかし、近年の航路増深の要請により航路延長が必要になり、それに伴って埋没対策工としての潜堤も沖合いに延長する必要が出て来ており、底引き網などの漁業に支障を来すことが懸念されている。

本研究では、泥土の挙動が容易に観察できる薄型水槽をつくり、漁業に支障のないように工夫した種々の断面形状を持つ潜堤を設置し、その周辺の泥土の挙動観察と航路内に流入する泥土量測定により、漁業に支障を来さない潜堤断面を求めた。試験断面は図-1 に示す通りで、熊本港で設置されている逆 T 字型の断面に対し、漁業への弊害が少ないと期待される台形型、さらに正弦波形を歪めた雨滴型の 3 種を対象とした。実験条件としては、波、流れが存在する場合も検討し、潜堤周辺の流れ構造を数値計算と実験により調べた。

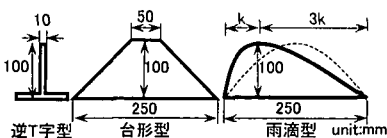


図-1 潜堤の断面形状

2. fluid mud の流動特性実験

2.1 薄型水槽による可視化実験

(1) 薄型水槽 (Slim-Tank)

実験に用いた水槽の全体図を図-2 に示す。水槽は長さ 3 m、高さ 1 m、幅 0.2 m で、シルテーション現象やその対策の効果を十分に観察できるように水路幅をできるだけ薄くしてよく透視できるようにしたことが特徴であり、これを薄型水槽 (Slim-Tank) と呼んでいる。水槽内部には 3 枚の仕切り板 (右から①②③) があり、②と③の間には航路を模した落ち込み部を設けてある。

この水槽の主な実験方法は、まず水槽に水を満たした状態で、仕切り板①②間の攪乱槽 (斜線部領域) に泥土を投入し fluid mud の浮遊濃度が一様となるように十分攪乱し、一定時間静置沈降させて人工的に fluid mud を形成させる。その後、仕切り板②を引き上げ泥土が航路へ流入する様子を観察するものである。また、波や潮流などの実際のシルテーション問題に大きく関わる諸要素の影響を調べるため、加振機と循環流発生用ポンプを取り付けてある。加振機は、その真下に潜堤などの模型を設置し、波を起こす代わりに潜堤などの構造物を往復させることで、波による底面付近の流体の往復運動と構造物の相対関係を表現するものである。

(2) 実験に用いた底質の特性

シルテーションで対象となる底質は、凝集沈降や自重圧密などの砂礫にはない性質を有するシルトや粘土質が

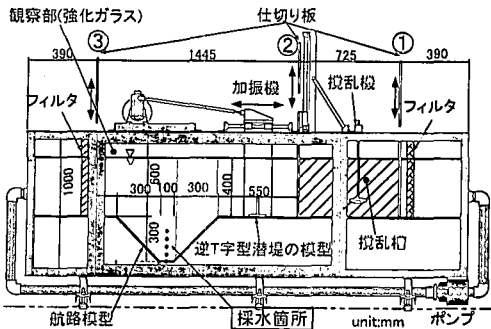


図-2 薄型水槽 (Slim-Tank)

* 学生会員 工修 九州大学大学院 工学府
** 正 会 員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院
*** 正 会 員 工修 九州大学大学院助手 工学研究院
**** 学生会員 工学 九州大学大学院 工学府
***** 正 会 員 工修 国土交通省(前九州地方整備局下関港湾航空技術調査事務所)

主体となり、これらが fluid mud を形成する。本研究では、市販のカオリナイトを主な底質材料とした。まず、沈降特性を把握するために大型シリンダー（直径 15 cm、高さ 90 cm）を用いた沈降試験を行った。図-3 は、一様の初期濃度に攪乱した後、自由沈降する場合の鉛直濃度分布を示したものである。図より、時間の経過とともに流動層（fluid mud）と沈積層の明瞭な濃度差が生じ fluid mud が形成される様子が確認できる。

（3） 実験条件

薄型水槽による実験条件を表-1 に示す。底質は主にカオリナイト、現地試料として熊本泥と中津泥を用い、攪乱槽内の初期濃度は 20 g/l と設定した。逆 T 字型、台形型、雨滴型の全ての潜堤高さ h_s は 10 cm とし、fluid mud の界面高 h_f を 5 cm と 10 cm の 2 種類とした。流況は水槽内の水の状態を表し、静水状態、加振機による波動場を再現した状態（波）、ポンプによる潮流を再現した状態（流れ）、波と流れを同時に作用させた状態（波＋流れ）である。今回の実験では、加振機は水深 40 cm において

波高 5 cm、周期 2 秒の波が通過する場合を想定し、ポンプは断面平均流速が 1.0 cm/s となるように設定した。

2.2 流動状況の観察結果

図-4 は、静水状態の流入状況の写真である。左から順に対策工を設置しないで界面高 h_f が 5 cm の場合、逆 T 字型潜堤を設置し h_f が 5 cm と 10 cm の場合であり、fluid mud が流入を開始してから 7 s 後を上段に、120 s 後を下段に示す。

対策工を設置しない場合（図-4a, b）、仕切り板②を引き上げた直後から航路に向かって fluid mud が底面に沿って移動を開始し、7 s 後には航路内に流入し始め、120 s 後にはほぼすべてが航路の落ち込み部に流入している。一方、逆 T 字型を設けた場合（図-4c, d, e, f）、潜堤は fluid mud の航路流入を阻止している。図-4d, f の 120 s 後の写真は白濁物が一部航路に流入しているが、これは図-4b で航路に流入しているものと比較するとはるかに濃度が薄く、fluid mud の上方に存在する極めて薄い濃度の部分のみが流入したと考えられ、fluid mud そのものは潜堤によってせき止められている。

図-5 は、界面高 h_f が 5 cm、波が存在する場合の流入状況である。左から順に逆 T 字型、台形型、雨滴型であり、7 s 後を上段に、120 s 後を下段に表示している。

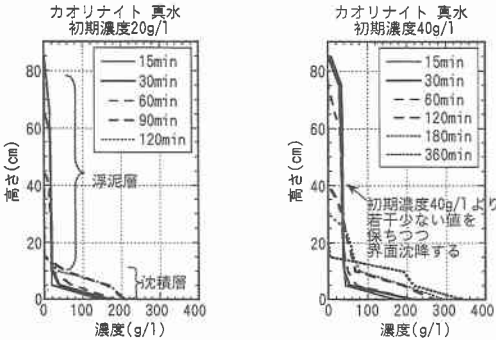


図-3 底質の沈降試験

表-1 実験条件

底質の種類	カオリナイト・熊本泥・中津泥
対策工	なし・逆 T 字型・台形型・雨滴型
初期濃度	20 g/l
潜堤高 h_s	全て 10 cm
界面高 h_f	5・10 cm
流況	静水・波・流れ・波＋流れ

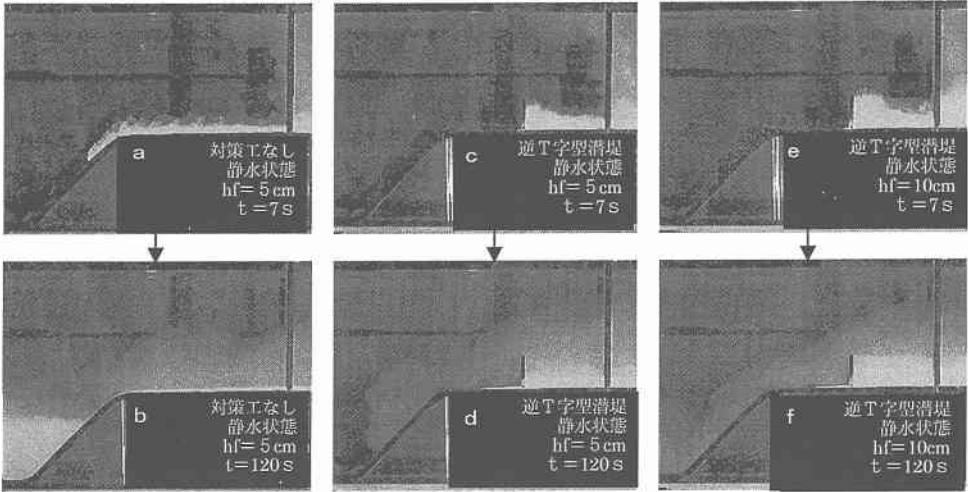


図-4 fluid mud の航路流入の様子（静水状態）

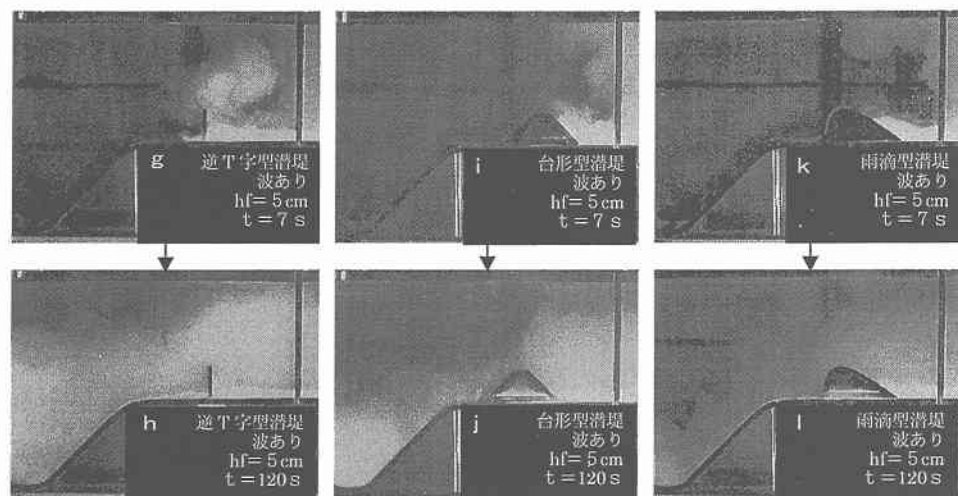


図-5 fluid mud の航路流入の様子 (波が存在する場合)

この場合、逆 T 字型の 120 s 後の写真(図-5h)は対策工なしの場合(図-4b)よりも広い面積で白濁している様子がわかる。本実験では、波ありの条件は潜堤を左右に往復運動させることで実現しているが、このときに潜堤上部に後流渦が発生する。逆 T 字型の場合はこのように渦が特に大規模であり、7 秒後の写真(図-5g)のような渦が fluid mud の界面に作用して fluid mud を巻き上げて攪乱し、水槽全体へ広がっていく様子が観察された。台形型の場合もまた、潜堤頂部の角に渦が発生し、fluid mud の界面を攪乱した。しかし、渦の規模は逆 T 字型と比較して小規模であったため巻き上げられた底質も少量であった。雨滴型の場合は渦が発生せず、fluid mud を攪乱することがなかったため、120 s 後の写真(図-5l)のように fluid mud の航路への流入はほとんどなかった。

2.3 fluid mud 流入量の定量評価

各実験条件における埋没阻止効果を調べるため、2 種類の方法を用いて航路へ流入した fluid mud の量を定量評価した。1 つは、fluid mud の流入開始 5 分後に、図-2 に示す航路中央部において底面から 5 cm 間隔で 20 cm の高さまでサイフォンにより採水し、航路へ流入した fluid mud の濃度を計測する方法である。もう 1 つは、fluid mud が航路へ流入する様子を撮影したビデオ画像から、画像解析によって濃度の測定を行う方法である。ここでは、ビデオ画像を 1 秒間隔で Bitmap ファイルに変換し、その画像の輝度を読み取り、別途に得た輝度と濃度の相関関係から輝度を濃度へと換算した。

図-6 は採水により得た濃度の鉛直分布である。左側に界面高 h_f が 5 cm、右側に 10 cm の条件、流況は上から順に静水、波、流れ、波+流れの条件について示した。まず、対策工の有無について比較すると、どの流況に対

しても対策工がある場合は対策工なしの場合よりも濃度が 1 オーダー小さい。また、 h_f が 5 cm の場合(図-6 左側)と 10 cm の場合(図-6 右側)を比較した場合は、全ての流況において 10 cm の場合の方が 5 cm よりも流入量が若干大きくなっており、潜堤高 h_s が界面高 h_f より高いほど航路の流入阻止効果が働くといえる。

次に、潜堤の形状による違いを流況ごとに比較する。静水状態の場合は流入量も非常に小さく、形状による fluid mud の流入量に顕著な差は見られない。波の場合、濃度が濃い順に逆 T 字型>台形型>雨滴型と明確になっている。これは 2.2 で述べたように、波により潜堤周辺に発生する渦の規模に対応している。また、逆 T 字型の 120 s 後の写真(図-5h)では、fluid mud が大量に流入しているように見えるが、実際に測定された濃度(図-6c)は対策工なしと比較して格段に小さい。流れの場合、潜堤形状による差はほとんどないが、非常に若干量ではあるが、この場合のみ雨滴型の濃度が他と比べて高くなっている。波+流れの条件では、波による巻き上げに流れによる fluid mud の輸送効果が加わり、逆 T 字型は台形型や雨滴型に比べて流入量が多くなっている。台形型と雨滴型は、濃度分布の傾向は似ているが、埋没量は台形型の方がわずかに多い。

図-7 は画像解析により求めた濃度を、図-2 の航路斜面部の陰影つきの領域について積分した量の時間変化であり、界面高 h_f が 5 cm の場合を図化したものである。図の横軸は fluid mud の流入開始からの経過時間、縦軸は算定された濃度であり、奥行き単位幅当たりに含まれる底質の重量 (g/cm) を表す。図-7a は、対策工の有無による比較を行うために、最も航路部へ流入した fluid mud の量が多い図-6g の場合を、載せたものである。

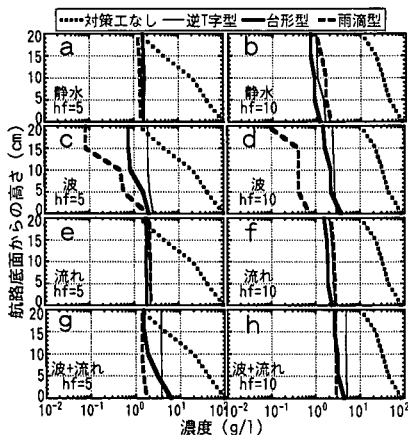


図-6 航路内部に流入した fluid mud の量 (濃度計測)

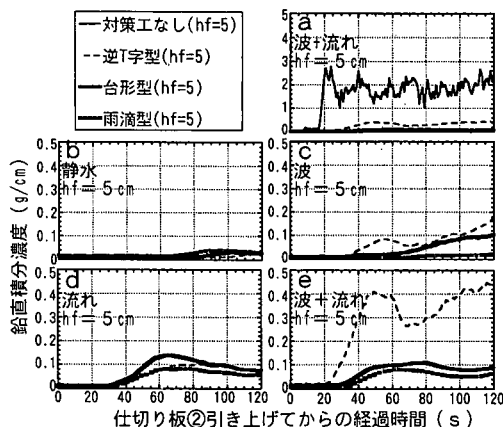


図-7 航路内部に流入した fluid mud の量 (画像解析)

図-7b, c, d, e は、3つの対策工を施した場合のみを示す。図-7より波に流れが加わった条件、特に逆T字型において多くの航路内流入量があることがわかる。

以上のことから、潜堤などの構造物により fluid mud の流入を阻止することで、航路内の埋没量を大幅に減少することができ、その場合、潜堤の高さが fluid mud の厚さより高いほど ($h_s > h_f$) 埋没阻止効果が高まることがわかった。また、潜堤の断面形状に対する違いが最も顕著に現れるのは、波を作用した場合であることが、図-6c, d からわかる。これらの実験から総じて、航路へ流入する fluid mud の量は T 字型 > 台形型 > 雨滴型となった。

3. 潜堤周辺の流れ場特性

3.1 流れ場の特性の評価

2章の結果、潜堤の断面形状がおよぼす埋没阻止能力の違いは、波が存在する場合に顕著に現れることを確認した。ここでは、波動下での潜堤周辺の流れ場および乱れ強度の特性に関する数値解析と実験とを行い、航路埋没に影響する渦の発生状況の比較を行った。

3.2 実験による流れ場の特性

実験は、長さ 28 m、高さ 0.5 m、幅 0.3 m の 2 次元造波水路により行い、造波板から 17 m 離れた地点に潜堤を設置した。実験条件は前章と同じ条件になるように、水深は 40 cm、入射波は波高 $H=5$ cm、周期 $T=2$ s の規則波であり、潜堤も全く同じ断面形状の 3 種類とした。実験方法は、潜堤周辺の水平流速をレーザー流速計を用いて測定し(サンプリング周波数が 100 Hz で 20 秒)、得られた流速データ u は定常流速 $\bar{u}$ 、波動成分 u_w および乱れ成分 u' に分割する処理を行った。得られた u' より、一周期平均の乱れ強度を以下のように求めた。

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u'^2} \quad \dots (1)$$

ここで、 N は 10 波分のデータ総数である。

図-8 は、上から順に逆 T 字型、台形型、雨滴型の乱れ強度の分布であり、渦の発生する箇所やそれが輸送される範囲において乱れが強いことが示されている。

逆 T 字型は、図面の潜堤頂部から右上に向かって乱れの強い領域が認められる。乱れ強度の最大値は逆 T 字型は 13.6 (cm/s)、台形型は 5.2 (cm/s)、雨滴型は 1.6 (cm/s) であり、逆 T 字型が最も強度が大きい。台形型は潜堤頂部の角に生じる渦の影響を受け、潜堤上部にやや強い乱れが分布している。雨滴型は、渦の形成がほとんど認められず、乱れ強度も 3 潜堤の中で最も小さく、波動場において渦が生じない形状といえる。

3.3 数値解析による流れ場の特性

本研究では、潜堤の断面形状を容易に変更できる有限要素法による流れ場の解析手法を採用し、波動下における潜堤周辺の流れ場の解析を行った。基礎式に、流れ関数に関するポアソン方程式および輸送方程式を用いた。

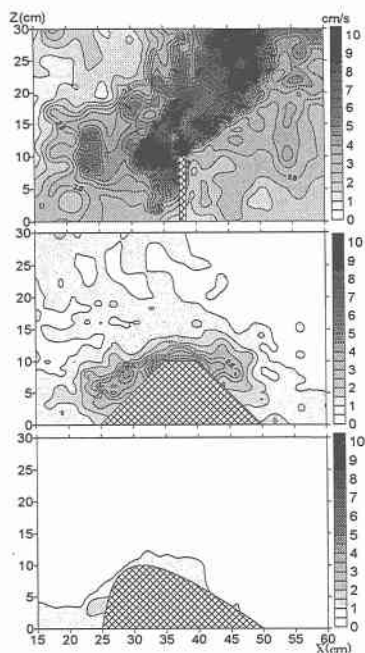
$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = (\nu + \nu_T) \nabla^2 \omega \quad \dots (3)$$

ここで、 ψ は流れ関数、 ω は渦度、 ν は動粘性係数、 ν_T は渦動粘性係数、 ∇^2 はラプラシアンである。乱流場における Reynolds 応力は、Prandtl の混合距離理論で取り扱えるものとして次式で評価した。

$$\nu_T = C l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right| \quad \dots (4)$$

ここで、 C は調整係数、 l は混合距離であり壁面からの距離 y^* に比例すると仮定し $l = \kappa y^*$ で表す。 κ は Karman 定数 (=0.4) である。解析領域は縦 35 cm、横 75 cm、三角形メッシュの一辺の大きさは 0.5~1.0 cm であり、入力波形は実験で得られた実測水位波形(波高 5 cm、周期 2 s)を用いた。境界条件は Dean の流れ関数理論および



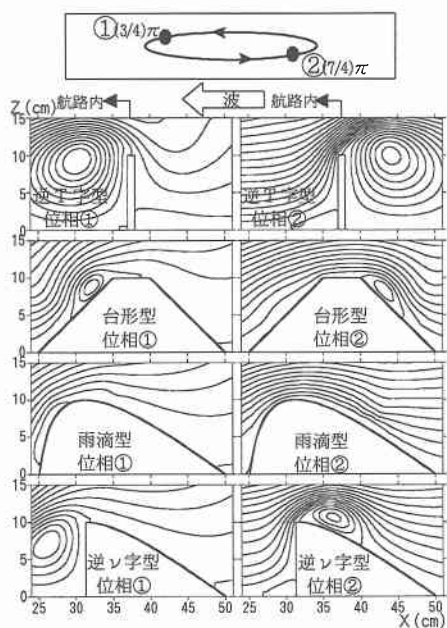
図—8 実験による乱れ強度分布

び一次元乱流境界層方程式を用いて、解析領域の上部と側方境界での ϕ および ω を求めた。底面境界は $\phi=0$ で、 ω を Thom のスキームで与えた。

潜堤の断面形状には、これまでの形状に新たに逆ノ字型を加えた。この形状は、雨滴型の緩勾配斜面側の形状と逆 T 字型の形状を組み合わせたものである。雨滴型は流れが強い場合に、fluid mud が潜堤を超える可能性があり、この点を改良する目的で解析対象に加えた。この逆ノ字型は、航路内へ向かって一旦潜堤を超た fluid mud を逆 T 字型と同様に発生した渦で攪乱させて濃度が減少し、航路内での沈降を抑制させることが期待できる。

図—9 は、計算で得られた流れ関数のコンターを図化したものであり、図の左側に流れが岸向きから沖向きへ反転する前の位相①、右側に沖向きから岸向きに反転する前の位相②の場合を表示した。図—9 より、計算結果の渦の規模も逆 T 字型 > 台形型 > 雨滴型の順となり、実験と同様の結果となった。

波による渦の形成と潜堤側面に fluid mud が存在する場合（図面では潜堤の右側）を想定して各形状の埋没阻止効果について考察する。逆 T 字型の場合は、渦の形成が大規模かつ強大であり底面付近の fluid mud を巻き上げやすいと思われる。台形型の場合、渦は潜堤の頂部両側に形成されるが、渦が及ぶ高さは潜堤高の半分の高さまでである。このため、界面高がこの高さ以下であれば、渦による fluid mud の巻き上げは生じないと考えられる。



図—9 数値計算による流れ関数のコンター図

雨滴型は、渦の強度は非常に弱く巻き上がる fluid mud 量は少ないと考えられる。逆ノ字型の場合、航路内では大規模な渦が形成されており、航路内へ流入した fluid mud を巻き上げるため有利であると思われる。一方、航路外の緩勾配では小規模な渦が形成されるが、渦の作用する高さは台形型よりも高い位置であることから、台形型よりも fluid mud を巻き上げにくいと考えられる。

4. おわりに

薄型水槽を用いてシルテーション現象を可視化することにより多くの重要な知見を得た。①潜堤などの構造物は fluid mud の航路への流入を阻止するのに非常に有効であり、潜堤高 h_s が界面高 h_f よりも高いほど ($h_s > h_f$) その効果が高まることがわかった。②潜堤の断面形状の違いによる影響は、波が存在する場合で最も顕著に表れ、この場合、逆 T 字型、台形型、雨滴型の順に航路への fluid mud の流入量が小さくなり、これは波による潜堤頂部に発生する渦の規模と対応していた。

謝辞：本研究で用いた計算プログラムは、熊本大学の滝川 清教授のご指導によるものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 滝川 清・米村浩介・前田孝久 (1991): 砂渾形成過程における底境界層の解析, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 1-5.
- Mehta, A. J. (1989): On Estuarine Cohesive Sediment Suspension Behavior, J. Geo. Res, Vol. 94, pp. 14,303-14,314.