

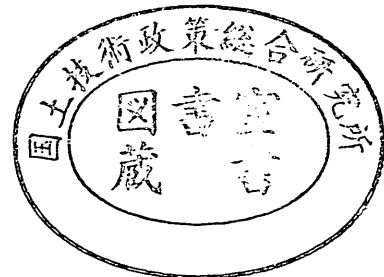
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 33 NO. 2 JUNE. 1994

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第33巻 第2号 (Vol.33, No.2), 1994年6月 (June.1994)

目次 (CONTENTS)

1. スペクトル形状による波群特性の変化
.....鈴木康正・河合弘泰・望月徳雄・松森孝弘..... 3
(Effect of Spectral Peakedness on Wave Grouping Characteristics
...Yasumasa SUZUKI, Hiroyasu KAWAI, Norio MOCHIZUKI and Takahiro MATSUMORI)
2. 衝撃碎波力に対する防波堤ケーソンの動的挙動
.....高橋重雄・下迫健一郎・上部達生 59
(Characteristics of the Dynamic Response of Composite Breakwater
against Impulsive Breaking Wave Force
.....Shigeo TAKAHASHI, Ken'ichirou SHIMOSAKO and Tatsuo UWABE)
3. 海中に設置された汚濁拡散防止膜の水理特性に関する研究
.....鶴谷広一・渡邊 弘・安岡大輔・工藤雅春 87
(Study on hydrodynamic characteristics of floating flexible barrier
.....Hiroichi TSURUYA, Hiroshi WATANABE, Daisuke YASUOKA and Massaharu KUDO)
4. 潜堤周辺の底泥の局所洗掘に関する実験的研究
.....鶴谷広一・吉永宙司・佐々木豊喜115
(Experimental Study on the Local Mud Scour near Submerged Walls
.....Hiroichi TSURUYA, Hiroshi YOSHINAGA and Toyoki SASAKI)
5. 合成版式ケーソンのフーチング部の力学特性と構造設計
.....清宮 理・山田昌郎141
(Mechanical Properties and Structural Design of Composite Footing
.....Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA)
6. コンクリート中の鉄筋のマクロ腐食と電気防食によるアノード,
カソードへ流入する電流および分極量
.....阿部正美・福手 勤・浜田秀則・三浦幸治181
(A Study of Current Density and Polarization Amounts by Cathodic
Protection for Macro Cell Corrosion of Steel Bars in Concrete
.....Masami ABE, Tsutomu FUKUTE, Hidenori HAMADA and Kouji MIURA)
7. 転圧コンクリートによる薄層オーバーレイ工法の開発
.....福手 勤・三浦幸治・浜田秀則・寺野宜成207
(Thin Bonded Overlay using Roller Compacted Concrete for Airport Concrete
Pavements
.....Tsutomu FUKUTE, Kouji MIURA, Hidenori HAMADA and Yoshinari TERANO)

8. 増粘剤を用いた高流動コンクリートの過密配筋部材への適用性	福手 勤・濱田秀則・三浦幸治231
(Applicability of super-workable concrete using viscous agent to densely reinforced concrete members)	Tsutomu FUKUTE, Hidenori HAMADA and Kouji MIURA)

4. 潜堤周辺の底泥の局所洗掘に関する実験的研究

鶴谷広一*

吉永宙司**

佐々木豊喜***

要 旨

熊本港のようなシルトや粘土が厚く堆積する海域に港湾や航路を建設すると、これらの微細粒子が航路や泊地に移動・堆積するシルテーションと呼ばれる現象が生じる。そこで、熊本港では暫定開港の平成5年3月までに、水深4.5m、長さ約2kmの航路の両側に埋没軽減のための直立潜堤を総延長約4kmにわたって設置した。本論文は、これまで十分に解明されていない直立型潜堤の周辺や、先端部での流れと波による底泥の洗掘について実験的に検討したものである。実験には粘土槽付きの長さ11m、幅40cm、高さ50cmの二次元造波水路を用いた。実験は、流れと波による潜堤周辺の底泥の移動・堆積の実験(実験1)と、流れによる潜堤先端部の洗掘に関する実験(実験2)に分かれる。実験1では底泥としてカオリナイトを用い、波および流れを作用させて潜堤周辺部の局所洗掘と堆積について調べた。実験2では、底泥としてカオリナイトとベントナイトを用い、比較のために砂を使った実験も行った。流れは2次元の光ファイバー式レーザードップラー流速計を用いて、乱れも含めた詳細な測定を行った。この測定された2次元の流速データを使って、3次元流速を推定するMASCONモデルを適用すると、潜堤周辺の複雑な3次元流れが求まることを示した。

キーワード：シルテーション、潜堤、カオリナイト、洗掘

*海洋水理部 水理研究室長

**前海洋水理部 水理研究室 (現第四港湾建設局下関調査設計事務所)

***前海洋水理部 水理研究室 (現第一港湾建設局伏木富山港工事事務所)

4. Experimental Study on the Local Mud Scour near Submerged Walls

Hiroichi TSURUYA*

Hiroshi YOSHINAGA**

Toyoki SASAKI***

Synopsis

Local mud scour near a submerged wall is investigated experimentally. The experiments are carried out for two phases. The aim of the experiment-1 is to investigate erosion and deposition by waves and currents near a submerged wall. The experiment-2 deals with erosion at the tip of a submerged wall. Bottom materials used in this experiment are kaolinite, bentonite, and sand. Velocities are measured with a 2-channel laser-Doppler anemometer. In the experiment-1, a reverse current region is formed behind the submerged wall. The eroded bed materials are transported toward the submerged wall by the reverse current and no significant scour could be observed just near the submerged wall. In the experiment-2, erosion process is discussed with the measured shear stress and pressure originated in turbulence.

Key Words : Siltation, Submerged Wall, Kaolinite, Local Scour

*Chief of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

**Formerly, Member of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

***Formerly, Member of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

目 次

要旨	115
1. まえがき	119
2. 実験装置と実験方法	119
3. 流れと波による潜堤周辺の底泥の移動・堆積の実験	121
3. 1 流れと波の場における潜堤周辺の底面せん断応力と底泥の移動状況	121
3. 2 潜堤周辺の底泥の洗掘と堆積の検討	122
4. 流れによる潜堤先端部の洗掘に関する実験	125
4. 1 潜堤先端部周辺の底泥の洗掘と流れ場	125
4. 2 MASCONモデルによる流れの解析	131
4. 3 底泥の洗掘機構について	135
5. 結論	139
6. あとがき	140
参考文献	140

1. まえがき

シルテーションとは、港湾などにおいて波や流れによって粘土やシルトなどの微細な底質が巻き上げられ、航路や泊地に堆積する現象で、特に東南アジアや南米といった河川からの流出土砂量の多い開発途上国の港湾では、維持浚渫に多額の経費が継続的に必要であることから、長い間この問題に悩まされている。これらの地域の港湾では、いまだに航路維持のためにかなりの費用をかけて浚渫が行われており、年間数百万m³の維持浚渫を行っている港も少なくない。このために財政的な負担も大きくなり、港湾の管理や発展に支障をきたしている。

一方、わが国ではこの種の問題を抱えた港湾が少なく、水理的にも複雑な現象が対象であるために、これまで十分な研究がなされていなかった。しかし、熊本港の建設をきっかけとして、シルテーションに関する研究が盛んに行われるようになってきた。九州の有明海に建設中の熊本港は、わが国では稀な東南アジアや南米の港湾と類似した自然条件下、つまり、底質が微細な粘土やシルトから成る遠浅の干潟海岸にあり、しかも潮汐差が大きい場所にある。このため、シルテーションによる航路や泊地の埋没対策として、これまでに現地データの取得や埋没量予測モデルの構築などが行われてきた。また、シルテーションで問題となる底泥の挙動を把握するために、最近、各種の室内実験も行われている。このような研究成果にもとづくわが国の技術援助に対して、開発途上国からの期待は非常に大きくなっている。

航路などの埋没対策の一例として、航路の両側に潜堤を設置し、海底付近を移動する底泥が航路に堆積する量を減少させるという方法が具体的に考えられている。潜

堤は、防波堤より建設費が安く、埋没軽減効果もかなり期待できるといわれている。しかし、潜堤などの構造物周辺の底泥の挙動については、ほとんど解明されていない。特に、潜堤自体の安定性が問題になるほどの局所洗掘が起こるのか、あるいは潜堤付近での極端な堆積により、潜堤としての効果が小さくなることはないのか、など疑問点が多い。さらに、底泥域に軟着堤のような防波堤を設置する場合、工事期間が多年度にわたることから、防波堤先端部の洗掘対策には局所的な流れの状況を十分把握して対応する必要があるものと考えられる。

本研究の目的は、以上のような問題点をふまえて、潜堤を設置したことによる周辺への影響を把握することにある。実際の海域において、波と流れは同時に作用することが多く、波と流れの進行方向は常に一定ではない。これらのことを考慮して、波とその進行方向に対して同方向および逆方向の流れを作用させて、潜堤周辺に敷き詰めた底泥の巻き上げ実験を行い、潜堤周辺の底泥の局所洗掘に関する検討を行った。

さらに、潜堤先端部の流れの場の把握と、それに伴う底泥の洗掘状況について検討した。

2. 実験装置と実験方法

実験は、図-1に示すような長さ11m、幅40cm、高さ50cmの二次元造波水路を用いて行った。波は水路左にあるピストン型造波装置により、流れは水路下部の廻流装置によって起こされる。水路の中央部の底泥層のものの長さは4mであるが、本研究では実験の便宜上1mをアクリルで固定床にして、長さ3m、幅40cm、高さ10cmの部分を泥槽として、ここに所定の泥を敷き詰めて実験を行った。

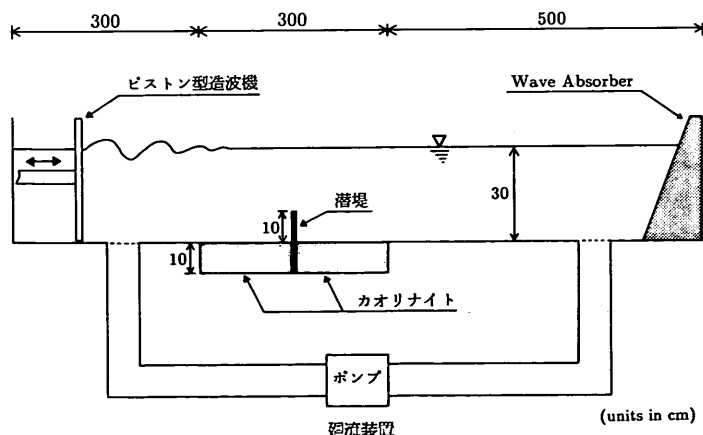


図-1 水路の説明図 (実験1)

実験は、流れと波による潜堤周辺の底泥の移動・堆積の実験と、流れによる潜堤先端部の洗掘に関する実験に分かれる。以後、前者を実験1、後者を実験2とする。

実験1では、水路中央部に潜堤を設置し、その前後1.5mを底泥床とした。底泥は幅40cm、厚さ10cmにわたって、真水を用いて含水比を165~175%に調整したカオリナイトを敷き詰めた。含水比は、予備実験から波や流れで適度に洗掘されることを確かめて決めたが、今回の実験で採用した含水比の値は、現地での海底上の泥をサンプリングして求めた範囲の中にある。底泥床の中央部には、水底からの高さ10cm、幅40cm、厚さ1cmのアクリル製の潜堤の模型を設置した。実験時の水深は30cmの一定とした。波と流れの作用時間は8~10時間とした。

実験ケースは、表-1に示すように、波と流れの進行方向が同じ順流のケース、波と流れの進行方向が逆の逆流のケースをそれぞれ2ケース、合計4ケースである。これらの他に、ケース1と同じストロークで造波した波のみ(ケース5)、および流れのみ(ケース6)の2ケースの実験も行っている。ケース5の波高は約2.2cmであった。波の周期は、ケース1~4すべて1.2sとした。波高は、ケース5を除いて田中・首藤(1980)が示した計算式にもとづく底面せん断応力の値が底泥上で平均0.5~0.6Paになるように設定した。つまり、各ケースともに同程度のせん断応力がかかっているが、ケース1,2は比較的波よりも流れの影響が強く、ケース3,4はケース1,2と比べて流れよりも波の影響が強いケースである。今回の実験を縮尺を1/10と考え、実際の海域にあてはめると、潜堤の高さは1.0m、水深が3.0m、波の周期が3.8s、作用時間が25.3~31.6時間に相当する。また、ケース1,2の波高は1.6~6.8m、平均流速が84.7cm/s、ケース3,4の波高は3.6~5.8m、平均流速が45.9cm/sとなる。

波高は容量式波高計を用いて、5~20cmおきに測定を行い、1点あたりの集録データ数は1,500個、サンプリング時間間隔は10Hzとした。水平および鉛直方向の流速は水路中央部を固定床として電磁流速計を用いて、20cmおきに、それぞれの場所で水底から1,2,3,4,5,7,10,15,20,25cmの10点で測定を行った。1点あたりの集録データ数

表-1 実験条件(実験1)

ケース	平均流速 (cm/s)	含水比 (%)	作用時間 (hr)
1(逆流)	26.8	171.6	10
2(順流)	26.8	171.1	10
3(逆流)	14.5	172.3	8
4(順流)	14.5	166.2	8

は1,024個、サンプリング時間間隔は10Hzとした。波と流れを作用させた後、底泥表面の地形の測定には超音波式測深器を用いた。以上の測定は、いずれも水路の中央断面上で行った。

実験2では、長さ3m、幅40cm、高さ10cmの泥槽の中に底泥を敷き詰めて、その上に潜堤を設置した。潜堤が流れによって移動しないように、潜堤の底板の下に2カ所抵抗板を取り付け、これを泥層に挿入し、泥の粘着力で流れによる力に抵抗して動かないようにした。潜堤の模型はアクリル板で制作した。寸法は、長さ85cm、幅20cm、高さ12cmである。この潜堤模型を図-2のように片面を水路のガラス面に当て、底泥上に設置して、流れが潜堤の直立部に直角に当たるようにした。流れは潜堤直立部の先端を回り込み、図-2に示すように先端部の底泥を侵食するようになる。この潜堤模型は現在熊本港に設置されているものの約1/10の縮尺となっている。座標軸は、流れの方向をx軸、流れと直角に潜堤直立部の先端方向をy軸、鉛直上向きをz軸とした。本実験での断面平均流速は、26.6cm/sとした。底泥は、真水で含水比を一定に調整したカオリナイト、ベントナイトおよび砂を使用した。洗掘深の測定では、時間的に変化していく底泥面を面的にとらえるため、一定時間流れを作用させた後一旦流れを止め、底泥で濁った水を徐々に真水と入れ替えて底泥面が見えるようにした後、底泥面の変化をポイントゲージで読みとる方法を採用した。測定した断面数は、カオリナイトの場合、含水比が180%の底泥で3断面、190%の底泥で2断面である。その他、ベントナイト、砂でも同様の測定を行っている。

流速の測定では、2成分光ファイバー式レーザードップラー流速計を使用した。プローブの直径は14mmで、この先端付近の小さい窓からプローブと直角に緑と青のレ

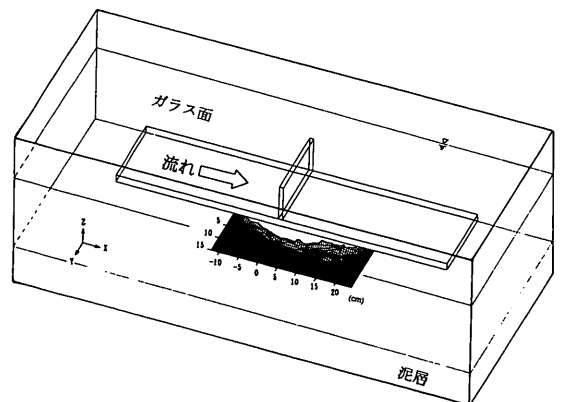


図-2 実験の状況(実験2)

レーザー光線が2本ずつ出て、6cm前方で焦点を結ぶようになっている。この焦点の部分で同時に2方向の瞬間流速を測定することができる。

プローブで検出されたドップラー信号は、やはり光ファイバーを通して信号処理器で流速値に変換される。信号処理器としては、DANTEC社のBurst Spectrum Analyzerを使用した。これは、ハード化されたFFT処理器を内蔵し、高速で高精度の流速測定ができるものである。ただし、このタイプの流速計は光を使用しているので、泥の濁りがある場所では測定ができなため、水路をアクリル性の固定床に変えて、その上に潜堤を設置して真水の状態で測定した。一測点あたりのデータ数は2047個とし、サンプリング周期は30Hz~50Hzとなるように、信号処理器を調整した。

3. 流れと波による潜堤周辺の底泥の移動・堆積の実験

3.1 流れと波の場における潜堤周辺の底面せん断応力と底泥の移動状況

図-3(a)~(d)は、それぞれケース1~4の実験後の底泥表面の地形、水平方向の流速 u の分布、波高 H の分布、田中・首藤(1980)の式から求めた底面せん断応力 τ_b の分布を示したものである。なお、○印は表-1に示される平均流速を用いて計算した τ_b の値であり、△印はそれぞれの地点の流速分布のうち、潜堤背後の逆流域の流速を無視して求めた平均流速を用いて計算した τ_b の値である。い

ずれの図も○印と△印の τ_b はほぼ等しい値となっている。縦軸は水底の位置を0とし、横軸は潜堤の位置を0として、順流、逆流のケースともに波の進行方向を正の向きとして設定している。また、ケース5の波のみ、あるいはケース6の流れのみのケースは、どちらも底泥の巻き上げはほとんどなかった。波のみあるいは流れのみと、波と流れの共存場の直接の比較はむずかしいが、波と流れが作用する場合には、波あるいは流れ単独の場合よりも底泥は巻き上げおよび移動しやすくなっているものと考えられる。

図-3(a)より、流れの進行方向に対して潜堤背後の $x=-70\sim-20\text{cm}$ において、波高が急激に増大している。この部分から底泥が巻き上がり始め、10時間後には最大約4cmの深さに洗掘された。これは、潜堤背後の波高が流れの影響で増大すると、その地点における τ_b も大きくなり、巻き上げに関する限界せん断応力 τ_e を越えるためである。巻き上げに関する式は、次式で表される(例えば、大坪(1984))。

$$E_r = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) \quad (1)$$

ここに、 E_r :巻き上げ率($\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 M :底質の種類や含水比によって決まる定数($\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)である。図-3(a)に示されるように、流れの進行方向に対して潜堤前面では、ほとんど巻き上げはなく、また潜堤背後が局所的に巻き上がっていることから、 τ_e の値は約0.6Paと考

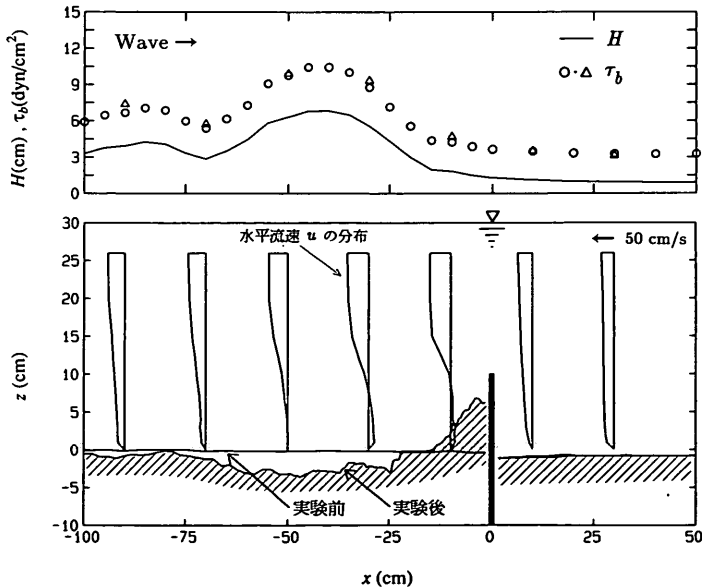


図-3(a) 底泥の地形変化と流速、波高、底面せん断応力分布 (ケース1)

えられる。鶴谷ら (1990) に示されている含水比と回転粘度計で求められる降伏値の関係から、含水比が170%のときの降伏値を求めると、5~6Paが得られ、今回の局所的に大規模な洗掘が生じている場合の限界せん断応力 τ_0 と1~2ケタ違う値となっている。

また、波高が最大となる $x=-40\text{cm}$ において、 τ_0 の値は約1.0Pa、 E_r の値は $5.2 \times 10^{-5} \text{ (g cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$ と算定され、上式から M の値を計算すると、 $7.8 \times 10^{-5} \text{ (g cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$ となる。この値は、Van Leussen and Dronkers(1988)が示している M の値の範囲 $1 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ (g cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$ に入っている。

3.2 潜堤周辺の底泥の洗掘と堆積の検討

写真-1は、ケース1で底泥の巻き上がる瞬間を撮ったもので、底泥表面が破壊して、そこからかなり大きな塊として巻き上がっているのがわかる。写真-2は、やはりケース1の潜堤付近で底泥の状況を撮ったもので、潜堤は写真右端である。潜堤背後には粒状の底泥が堆積し、その下には、潜堤側に向かって力がかかっていることを示す筋が確認できる。潜堤背後に堆積している底泥は、巻き上げられて潜堤付近に運ばれたものと考えられる。

これは流れの場に潜堤などの構造物が設置された場合、潜堤の高さの約10倍下流側すなわち潜堤背後1m程度までは反流域となり(鶴谷ら(1987))、巻き上げられた底泥が反流によって潜堤側に運ばれるためである。このとき堆積する底泥は、粒径の粗いもので、これは反流によって運ばれる底泥のうち、重いものは潜堤付近に堆積し、軽いものは流れによって、遠方に運び去られてしまうためと考えられる。

写真-3, 4は、ケース1で写真撮影のために実験後に濁った水を水道水と入れ換えて撮ったものである。写真-3は潜堤付近の底泥の堆積と洗掘の様子を示している。潜堤付近には、粒の大きい底泥が堆積しているのが確認できる。また、洗掘された場所には水路と平行な方向に筋がみられるが、これは反流域内のかかなり乱れの大きい流れによって底泥が巻き上げられたために生じたものと

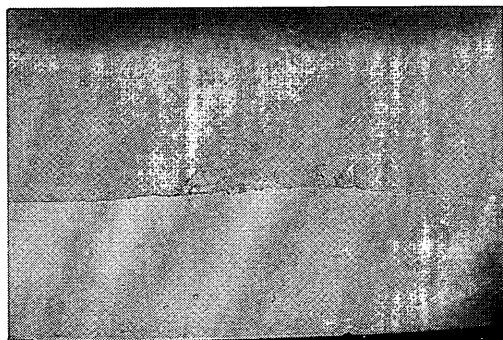


写真-1 底泥の巻き上がる瞬間 (ケース1)

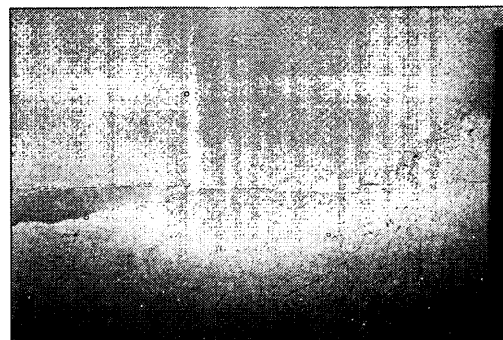


写真-2 潜堤付近の底泥の状況 (ケース1)

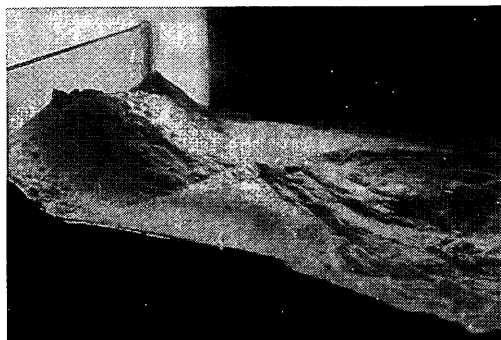


写真-3 $x = 0 \sim -50\text{cm}$ の底泥の状況 (ケース1・実験後)

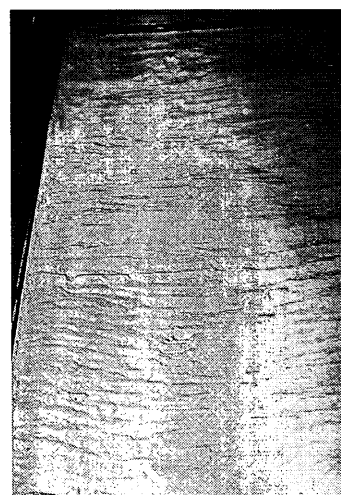


写真-4 $x = -100\text{cm}$ 付近の底泥の状況 (ケース1・実験後)

考えられる。写真-4は、潜堤背後1m以降の底泥の洗掘の様子を示している。反流域内の洗掘と違って、水路と垂直すなわち横断方向に筋ができており、これは主に波の働きで底泥が巻き上げられたためと考えられる。

図-3(b)はケース2の実験結果であるが、このケースはケース1のような波高のピークはないものの、 $x=40\text{cm}$ あたりから流れの影響を受けて波高がやや増大し、 τ_b の値が 0.6Pa を越える地点では、やはり巻き上げが起きている。これは、ケース1のような局所的な洗掘ではなく、広い範囲のほぼ一様な洗掘である。流れの進行方向

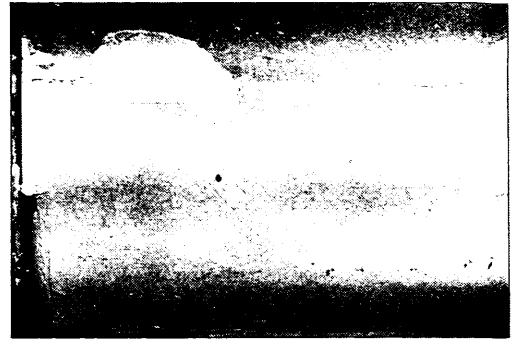


写真-5 潜堤付近の底泥の状況 (ケース2)

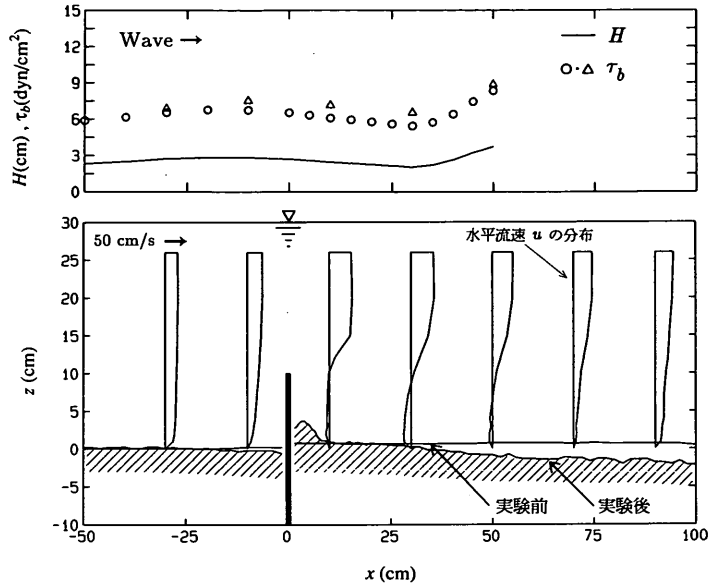


図-3(b) 底泥の地形変化と流速, 波高, 底面せん断応力分布 (ケース2)

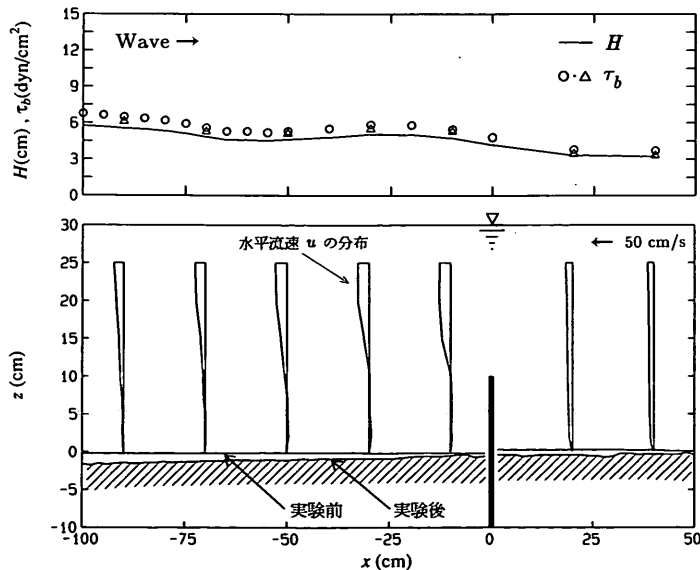


図-3(c) 底泥の地形変化と流速, 波高, 底面せん断応力分布 (ケース3)

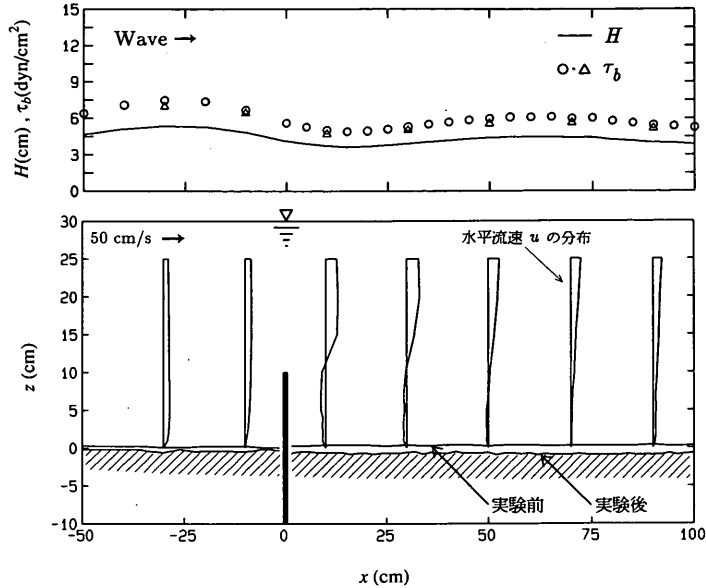


図-3(d) 底泥の地形変化と流速, 波高, 底面せん断応力分布 (ケース4)

に対して潜堤前面は, 潜堤付近でわずかに巻き上がっているが, ほとんど地形の変化はみられない。

写真-5は, このケース2で潜堤背後の底泥を撮ったもので, ケース1は, 巻き上げられた底泥が潜堤付近に堆積しているのがはっきりわかったが, ケース2では, 底泥が盛り上がっているだけでほとんど堆積していないことがわかる。これは, 底泥の波動運動が潜堤背後のかなり広い範囲で起こり, 潜堤の存在で水平方向の波動運動が抑制されて上方に盛り上がったものと考えられる。またケース1と比較して, 巻き上がる底泥の粒径が小さく, この底泥は逆流によって潜堤付近まで運ばれるが, 堆積せずに流れによって後方に運び去られるものと考えられる。

図-3(c), (d)では, どちらのケースも平均して波高が高いために, 量は少ないものの全域にわたって底泥が巻き上がり, 洗掘が起こっている。また, 潜堤付近の堆積はほとんどみられず, これは流速分布からもわかるように逆流が弱く, 巻き上げられた底泥の移動が少ないためであると考えられる。また, これまでのケースと同様に, τ_b が0.6Paを越えると巻き上げの量が多くなっている。ケース3では, 流れの影響によって $x=-30\sim-20$ cmでやや波高が大きくなっているが, 局所的な洗掘はみられず, 波が進行していくにしたがって波高減衰により, 巻き上げ量は減少している。ケース4では, 流れの影響によって潜堤の背後でやや波高が大きくなるため, 巻き上げ量も多くなっている。

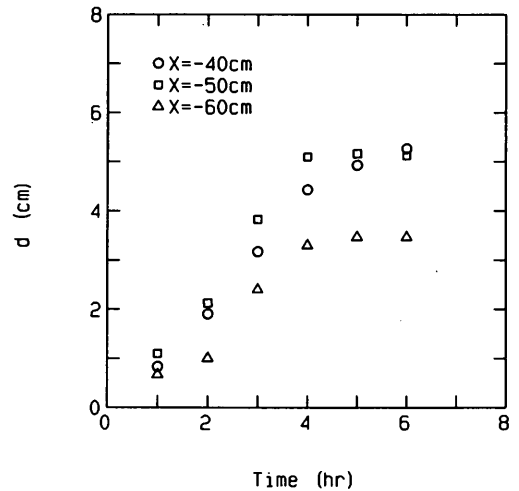


図-4 潜堤周辺の底泥

図-4は, ケース1と同じ波と流れを含水比164.1%のカオリナイトに作用させた場合の, 時間経過と洗掘深の関係を示したものである。測定は, $x=-40, -50, -60$ cmで行い, 水路の中央断面上と10cm離れた2断面上, 合計3断面上の平均値をとった。図より, 巻き上げは4時間ぐらいでほぼ終わったと考えられ, その後はほとんど洗掘されていない。これは, 洗掘によって地形がかなり変化するために, 波や流れの作用する条件も変わり, τ_b の値が小さくなるのと, 洗掘に時間を要して下部底泥はかなり構造を回復して強度が大きくなっているためと考えられ

る。また、洗掘深がケース1の値に比べて大きいのは、中央よりも側壁の近くで、洗掘深が大きかったためである。

4. 流れによる潜堤先端部の洗掘に関する実験

4.1 潜堤先端部周辺の底泥の洗掘と流れ場

所定の含水比を持つ底泥を作り、これを泥槽に敷き詰めた後、潜堤模型を設置して流れを作用させて潜堤先端部の洗掘を観測した。図-5は、含水比 W が180%のカオリナイトの洗掘状況を示したものである。流れは、図-2

に示したように、潜堤直立部に直角にあたるように作用させている。底泥は、潜堤先端のほぼ中央付近から洗掘され始め、その部分から後方へ剥がれるように進んでいる。洗掘された部分の近くにはひび割れが生じていた。泥の巻き上げは流れを作用させてすぐ始まるのではなく、流れを長時間作用し続けることにより巻き上がり始める。同一の実験を行っても、含水比の微妙な違いや泥を敷き詰める際の不均一性などによって、同じ時間で巻き上げが同一地点から同一速度で進行するわけではないが、巻き上がり始める地点は潜堤の中央部付近であることは変わらなかった。図-5(1)は流れを作用させ始めてから2.5

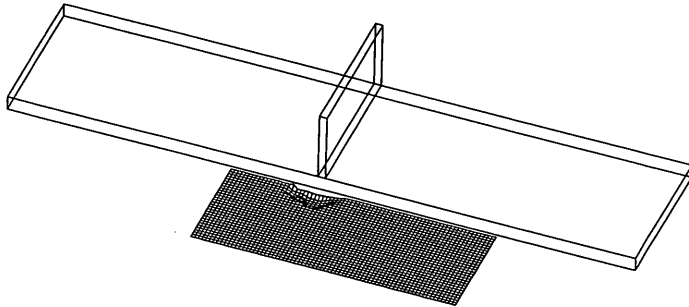


図-5(1) 潜堤先端部の洗掘 (カオリナイト, $W=180\%$, 2.5時間後)

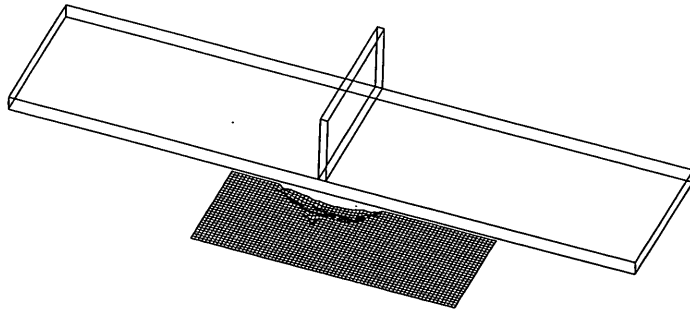


図-5(2) 潜堤先端部の洗掘 (カオリナイト, $W=180\%$, 3.5時間後)

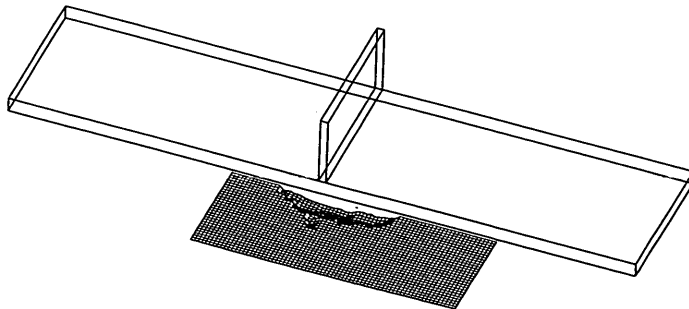


図-5(3) 潜堤先端部の洗掘 (カオリナイト, $W=180\%$, 4.5時間後)

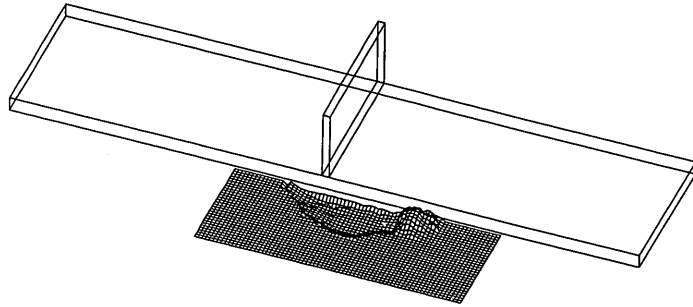


図-6(1) 潜堤先端部の洗掘 (カオリナイト, $W=190\%$, 0.5時間後)

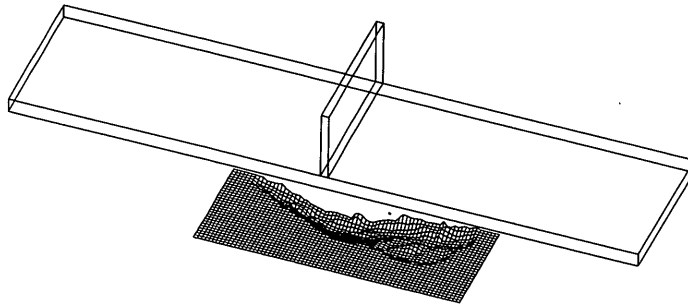


図-6(2) 潜堤先端部の洗掘 (カオリナイト, $W=190\%$, 1時間後)

時間経過したときのものであるが、洗掘が起こり始めてからそれほど時間は経っていない。その後、図-5(2), 5(3)に示されているように、潜堤直立部の延長部分がまず最初に洗掘され、洗掘域は徐々に広がっていく。当然、流れの方向に向かって洗掘領域は広がっている。

図-6は、図-5と同じカオリナイトを用いたが、含水比を190%に増加した底泥を用いた場合の実験結果である。含水比としては図-5のケースより10%だけの増加であるが、底泥の洗掘状況はかなり異なっている。図-6(1)に示すように、流れを作用させ始めてからすでに0.5時間でかなりの領域が洗掘され、洗掘域の下流端は底泥が盛り上がっている。さらに1時間後には、図-6(2)に示すようにかなり広い領域が洗掘されている。このような違いについては後で考察するが、底泥の強度が大きく関係していることを示している。

図-7は底泥の洗掘部の平面的な広がりを時間ごとに示したものである。底泥の含水比は図-6と同じ190%であるが、前に述べたとおり、実験毎の違いが出ている。最初の洗掘は潜堤直立部から約2cm離れた位置から生じている。流れを作用させ始めてから1時間程度までは洗掘域はそれほど急激には広がらないが、1時間以後は急速に洗掘域が広がっているのがわかる。定量的に議論することはむずかしいが、泥の強度は時間的に一定ではな

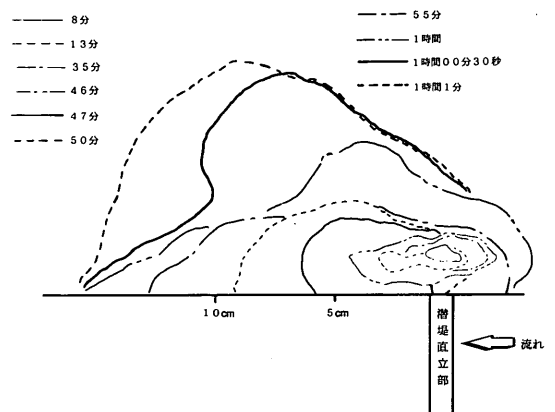


図-7 底泥の洗掘領域の平面的広がり状況 (底泥は図-6と同じ)

く、所定の含水比になるように水を加えてよく攪拌し、調整した底泥を泥槽に設置し、しばらく放置すると構造を回復し、強度を増すと言われている。また、長時間になれば圧密によっても強度は増加する。しかし、流れが継続的に作用すると、表面にせん断応力が働き、またこのように流れの急変する場所では乱れによる圧力変動も加わることとなる。このように、泥の強度の変化と外力とのバランスで洗掘が決まるものと考えられる。

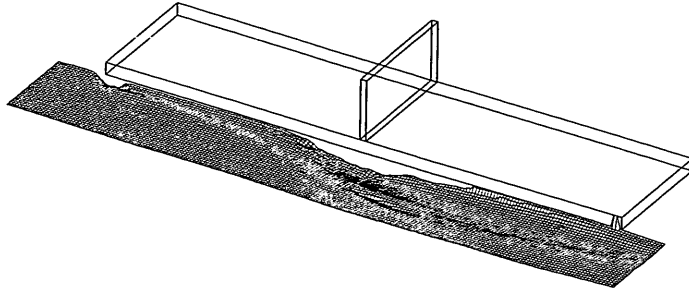


図-8 潜堤先端部の洗掘 (ベントナイト, $W = 226\%$, 3時間45分後)

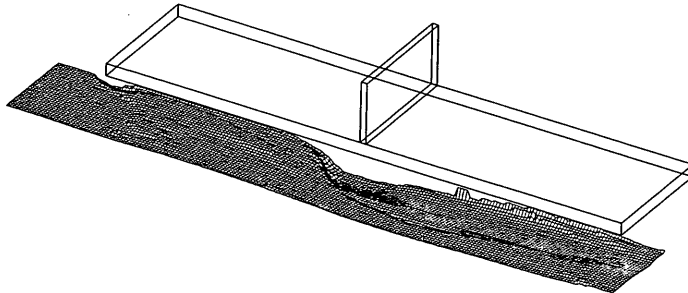


図-9 潜堤先端部の洗掘 (ベントナイト, $W = 251\%$, 6時間53分後)

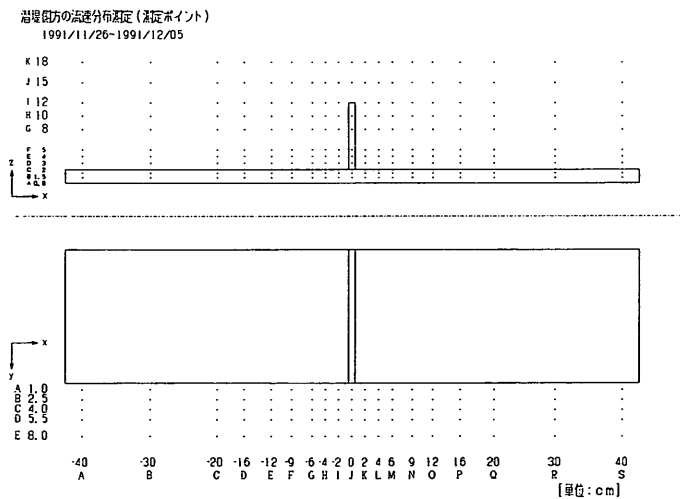


図-10 流れの測定ポイント

図-5, 6には示していないが, 洗掘された底泥の一部は潜堤の背後に堆積していた。このことから, 底泥の移動を総合的に検討するためには, 潜堤周辺の流れの場を詳しく知らなければならないことがわかる。

図-8は, ベントナイトの洗掘の状況を示している。含水比は226%で, 真水で混合した。ベントナイトの巻き上げの形態は, カオリナイトのそれとはかなり異なり, 広

い範囲にわたって底泥面が少しずつ巻き上げられていく。潜堤底面の上流部と直立部の付近で洗掘深が大きくなっているが, ここで流れが急に変化し, 流速と乱れが大きくなっていることによる。また, カオリナイトと違い, 底泥が潜堤の底板に沿って全面的に洗掘されている。図-9は同じベントナイトであるが, 含水比がやや高く251%の場合である。この図は6時間53分後のものである

が、洗掘のパターンは図-8と良く似ている。

これまで洗掘の状況について示してきたが、その結果は流れと密接に関係しているのではないかということを示唆している。そこで、乱れも含めて流れの詳細な測定を行うため、二成分光ファイバー式レーザードップラー流速計を用いた。流速の測定点は図-10に示す通りで、総測定点数は1045点である。図-10の平面図の上端は、水路のガラス面に接している。図中、 x 軸方向の測点にはAからS、 y 軸方向にはAからE、 z 軸方向にはAからKまでの名称を付けてある。以後、測定点を z, y, x 軸の順に並べて測点AACのように表す。すなわち、測点AACは、 $z=0.8$ cm、 $y=1.0$ cm、 $x=-20$ cmの地点を表している(図-10参照)。これらの測点では $x-z$ 方向の流速、すなわち水平と鉛直方向の流速の測定を行った。さらに、参考のために潜堤直立部の前部と背後における水平と鉛直流速と、 $z=1.5$ cmと2 cmの高さにおける $x-y$ 方向の水平2成分の流速測定も行っている。

流速の時間変化の測定結果の一例を図-11(1)~11(4)に示す。図中、下から順に x 方向の流速成分 U 、 z 方向成分 W そしてこれら2方向の流速の乱れ成分の瞬間値から計算されるレイノルズ応力(例えば、日野(1992)参照) $-uw$ を示している。図-11は、底面に一番近い高さ0.8 cmで、 y 方向にも潜堤から一番近い1 cm離れた測線に沿ったところで測定したものである。図-11(1)は潜堤直立部より20 cm上流の測点AACのものである。水平・鉛直両方向とも乱れ成分は非常に小さく、レイノルズ応力も当然小さい。図-11(2)はさらに潜堤直立部に近付き、直立部より4 cm上流側のものである。直立部の影響が出てきて乱れが大きくなっている。レイノルズ応力も瞬間的に $300 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ を越えることがある。底泥面に働く平均的なレイノルズ

応力は瞬間的なレイノルズ応力を平均したもので与えられる。図-11(2)ではこの値は $-1.2 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ である。値が負になるということは、せん断応力の方向が流れと反対側、つまり上流側に向かっていることを示している。図-11(3)は潜堤直立部の真横でのもので、乱れ成分・レイノルズ応力ともさらに大きくなっている。ただ、平均レイノルズ応力は $3.0 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ で図-11(2)の場合とは符号が逆になり、せん断応力の働く方向は流れと同じ方向となっている。瞬間レイノルズ応力は正・負ともに $300 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ のオーダーを越えて、非常に大きな変動を繰り返している。これは、底泥表面にせん断応力が正と負の方向に常に作用していることを示している。図-11(4)は潜堤直立部より4 cm下流側で、図-11(3)よりは乱れ強度、レイノルズ応力共小さくなっている。

図-12は測点ABJで、図-11(3)と同じ潜堤直立部の真横で、潜堤から2.5 cm離れた場所でのものである。図-11(3)よりも乱れはさらに大きくなり、瞬間レイノルズ応力の絶対値は $500 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ を越えている。

図-13は、測定された U 成分と W 成分から平均流速ベクトルと乱れ強度を求めて y 断面の平面分布として示したものである。図の上から $y=1$ cm、2.5 cm、4 cm、5.5 cm、8 cmと、順に潜堤から遠ざかるように示してある。

ここに、乱れ強度は次式で求めたものである。

$$\text{乱れ強度} = \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2)$$

ただし、 u は x 方向の瞬間的な乱れ成分、 w は z 方向の瞬間的な乱れ成分を示し、 $\bar{\quad}$ は測定時間にわたっての平均を示す。潜堤からすぐ近くの $y=1$ cmでは、特に底面に近いところで流れは複雑になり、乱れ強度も大きくなる。 $y=2.5$ cmでは流れは下方向に向かい、乱れ強度も底面付近

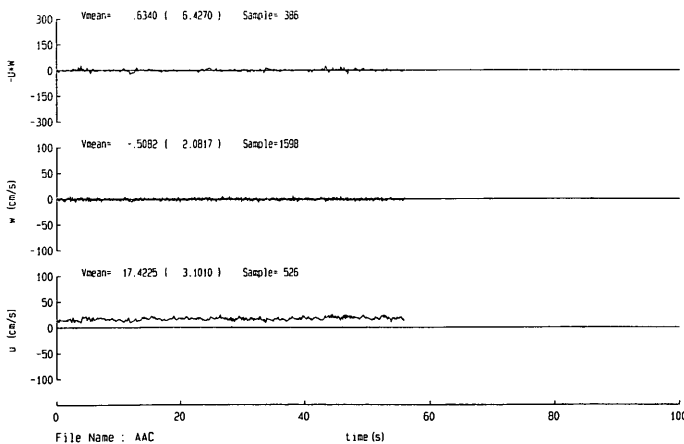


図-11(1) 流れとレイノルズ応力の時間変化(測点AAC)

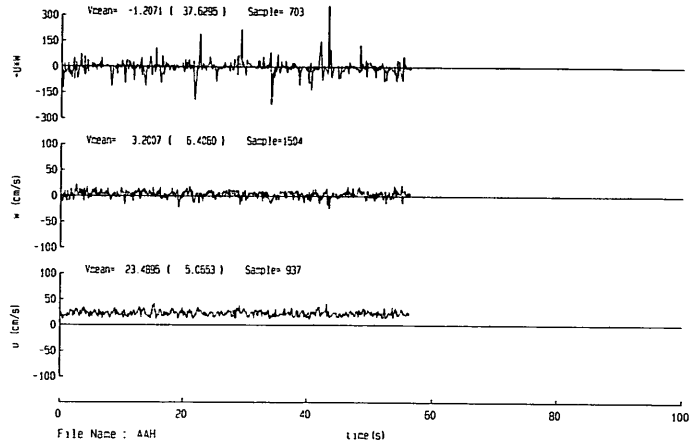


図-11(2) 流れとレイノルズ応力の時間変化 (測点AAH)

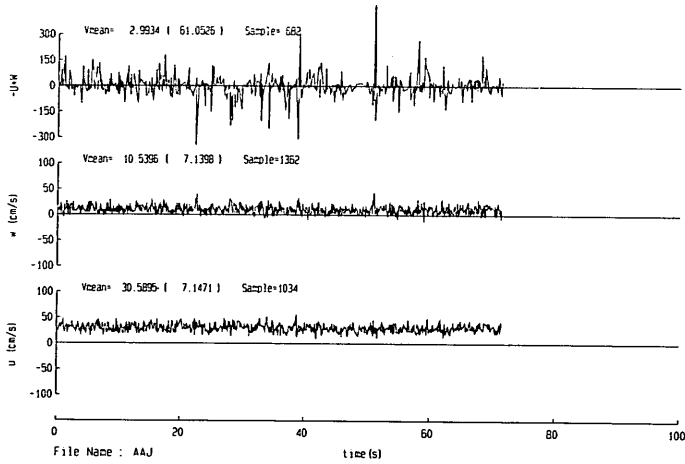


図-11(3) 流れとレイノルズ応力の時間変化 (測点AAJ)

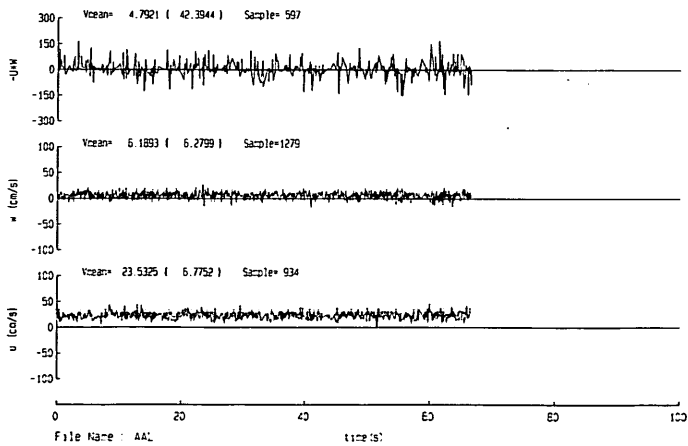


図-11(4) 流れとレイノルズ応力の時間変化 (測点AAL)

潜堤周辺の底泥の局所洗掘に関する実験的研究

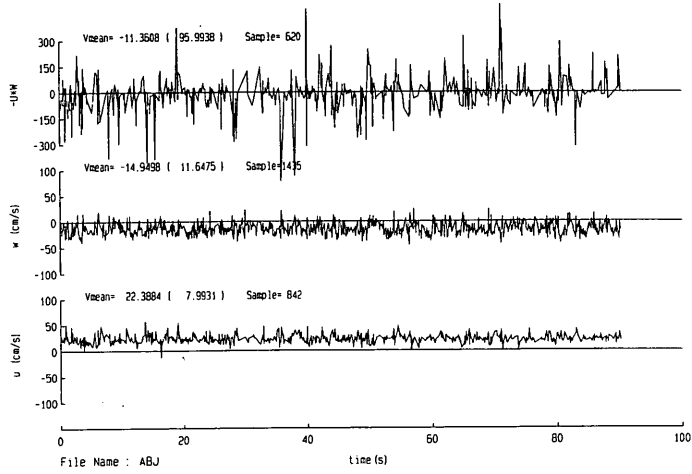


図-12 流れとレイノルズ応力の時間変化 (測点ABJ)

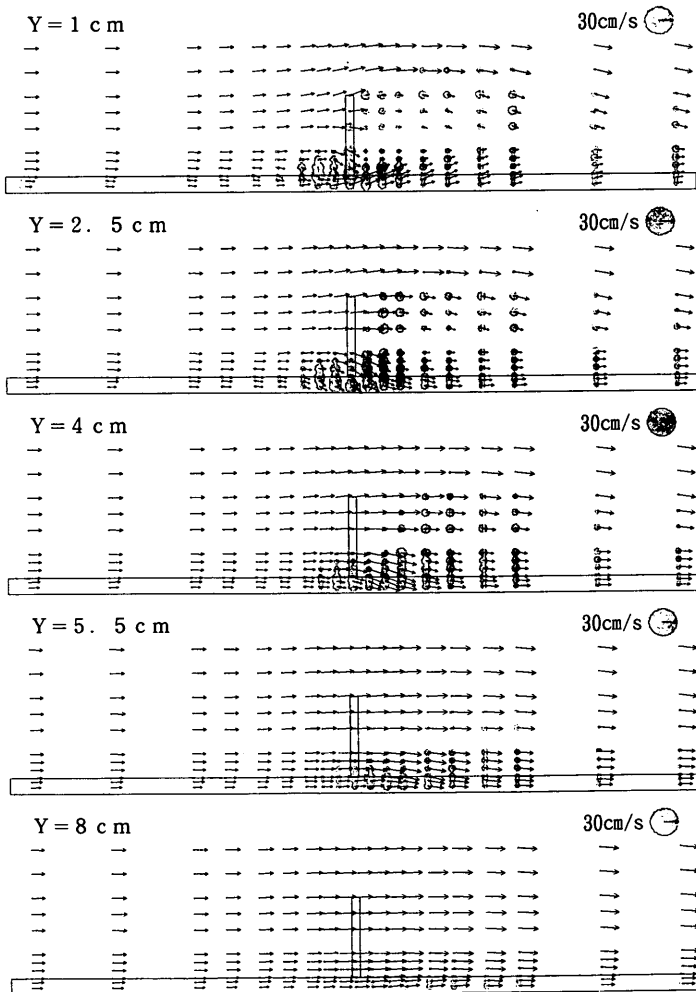


図-13 流速ベクトルと乱れ強度の分布

で大きくなっている。図-7でも最初に洗掘が始まるのは $y=2.5\text{cm}$ の付近で、流速ベクトルが下を向き、乱れ強度が大きくなる位置とほぼ一致している。さらに潜堤から遠ざかると、乱れ強度も徐々に小さくなり、流速ベクトルも下向きから水平方向に向くようになる。

図-14は潜堤直立部前後での平均流速ベクトルと乱れ強度を示したものである。潜堤を越えた流れは速くなり、潜堤背後には $y=-4\text{cm}$ 程度から乱れの強い反流域が形成されている。ここには洗掘された底泥の塊が集まって堆積するようになる。ただし、実際の海域では、潮流は流れの方向を変えるので、特定の場所に堆積する傾向は弱まることになると考えられる。

図-15は、平面的な流速ベクトルと乱れ強度の分布を示したものである。 $z=1\text{cm}$ と 2cm で流速ベクトルの向きがやや異なり、底面に近い $z=1\text{cm}$ の方が $z=2\text{cm}$ の場合よ

り潜堤から離れた位置で外に向かう流れが強くなっている。乱れ強度の分布と図-7の洗掘パターンの拡がりも、定性的にはほぼ一致している。

4.2 MASCONモデルによる流れの解析

前節ではレーザードップラー流速計による2成分の流速場の測定結果を示した。これからは、流速の変動成分に関する詳細なデータが得られるので、乱れ強度やレイノルズ応力等の瞬間的な変動について知ることができる。しかし、洗掘された底泥の移動方向や、堆積場所の検討には平均流速の流れ場全体の分布を知ることが必要となる。レーザードップラー流速計では流速の3次元成分を測定するのは非常に大変なため、これまで得られた u, w の2次元成分を用いてMASCONモデルによる3次元の流速場を推定することを試みる。

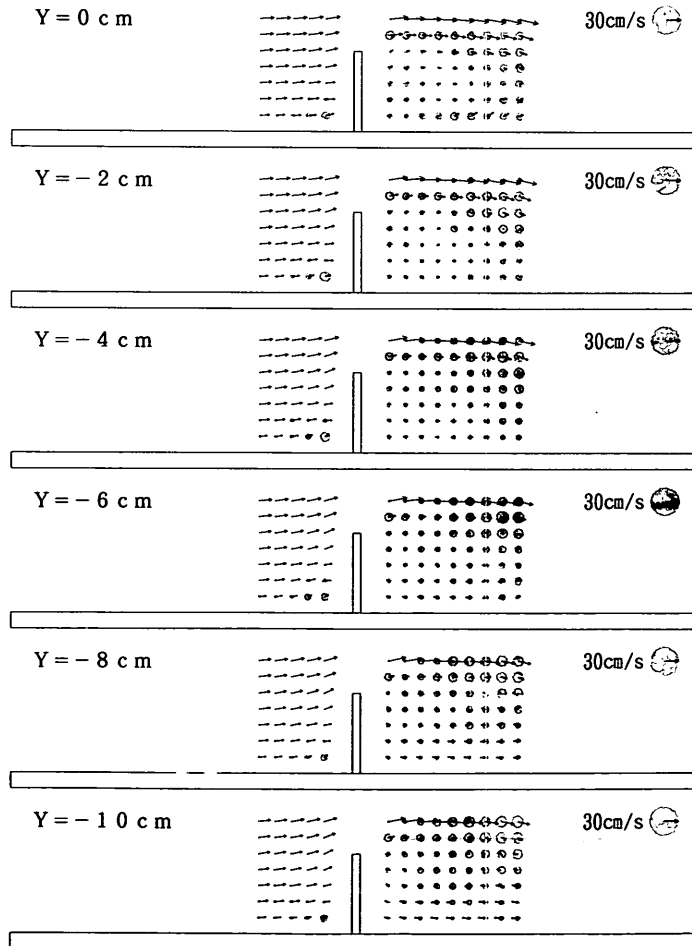


図-14 流速ベクトルと乱れ強度の分布

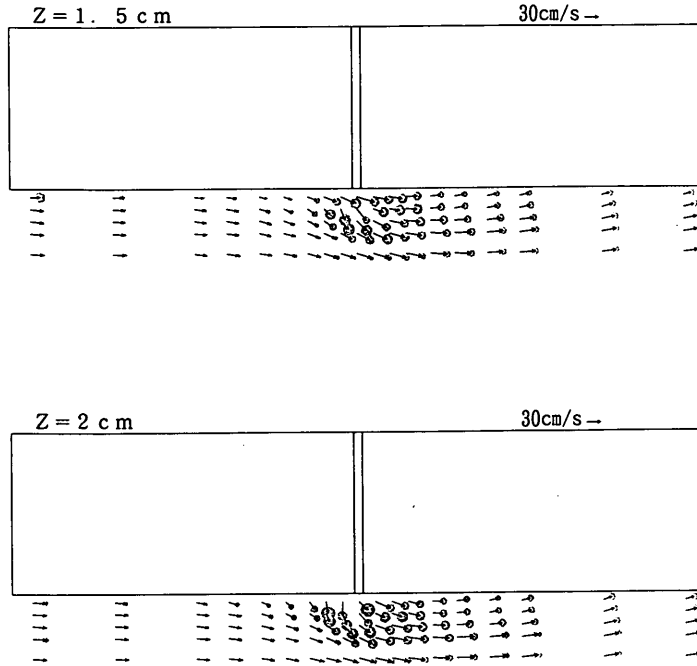


図-15 流速ベクトルと乱れ強度の分布 (平面分布)

MASCONモデルはmass consistent (質量不変) な場を表すモデルで、気象学の分野で複雑な地形上で観測データから風速分布を推定する方法として発達した。日野他(1989)は、MASCON法を用いて数点の流速データから非定常流れ場全体の瞬間像を推定している。また、小林(1991)は、波動場での2成分流速データの位相平均値から残りの1成分を推定して、波動場での円柱周辺の局所洗掘が流体運動におよぼす影響について解析を行っている。

以下にMASCONモデルの概略を示す。流体の連続式を満たす条件として、流速測定値を以下の手順で修正する。

1. 推定値あるいは測定値が与えられる。

$$2. a_x^2(u-u_0)^2 + a_y^2(v-v_0)^2 + a_z^2(w-w_0)^2 \quad (3)$$

を最小とするように u_0, v_0, w_0 を修正して u, v, w を決定する。

ここに、 a_x, a_y, a_z は各成分の重みである。

上の2の条件を満たすには、Lagrangeの未定乗数 λ を用いて汎関数 $E(u, v, w, \lambda)$

$$E(u, v, w, \lambda) = \int_V \left[a_x^2(u-u_0)^2 + a_y^2(v-v_0)^2 + a_z^2(w-w_0)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (4)$$

を最小にすればよい。ここに、積分範囲 V は対象としている3次元空間の領域全体を表す。式(4)の $E(u, v, w, \lambda)$ を最小にする解は、Eulerの方程式を用いて

$$u = u_0 + \frac{1}{2a_x^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad (5)$$

$$v = v_0 + \frac{1}{2a_y^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \quad (6)$$

$$w = w_0 + \frac{1}{2a_z^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (7)$$

で与えられる。ここに、 u, v, w は次の連続の条件

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

を満たす。このとき、以下のような λ に関する楕円型偏微分方程式が得られる。

$$\frac{1}{a_x^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{1}{a_y^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \frac{1}{a_z^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} \quad (9)$$

$$= -2 \left[\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} \right]$$

境界条件として、流体の流入がある場合は $\lambda = 0$ とし、流入がない場合は $\partial \lambda / \partial n = 0$ とし、これをS.O.R.法

で解いて λ を求め、式(5), (6), (7)から u, v, w を求めることができる。ここに、 n は境界面の法線外向きの単位ベクトルである。実際の計算ではメッシュ間隔を1cmとして、時間依存の非定常問題としてFTCS (Forward-Time Centered-Space) 差分を用いて解いた。

図-16は計算結果の一例で、底泥表面から1cm ($z=1$ cm)の高さでの計算から求められた流速ベクトルを3次元表示したものである。潜堤底板の厚さは2cmで、流速が表示されているメッシュ間隔は1cmである。潜堤背後に回り込む流れが計算で出ていることがわかる。図-17は $z=2$ cmのケースで、潜堤先端から遠ざかる流れが出ている。図-18はさらに上の $z=4$ cmの場合で、潜堤直立部を回り込む流れは下の方ほど大きくない。これは、反流域の影響であると考えられる。図-19は潜堤の天端高さ ($z=12$ cm)より高い $z=14$ cmの場合で、潜堤直立部に近いところでは上昇流が生じている。このように、MASCANモ

デルによれば、2次元の測定データから3次元の平均流速場を推定することが可能である。

ここで得られた3次元の流速場から、渦度を求める。渦度の x, y, z 方向成分は次のようにベクトル表示される。

$$\omega = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (10)$$

例えば x 成分の渦度 ξ は、 x 軸に対して垂直な面 (yz 平面)の角速度の大きさを表し、正の値が反時計回り、負の値が時計回りを表す。底面近く ($z=1.5$ cm)の渦度の平面分布を図-20に示す。これによれば、潜堤の近くで非常に渦度の強い場所があり、洗掘の大きいところとほぼ一致

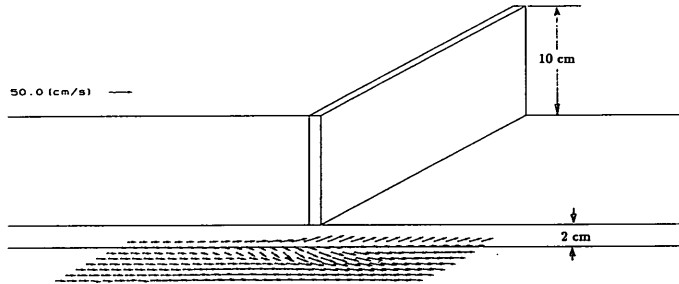


図-16 流速ベクトルの3次元表示 ($z=1$ cm)

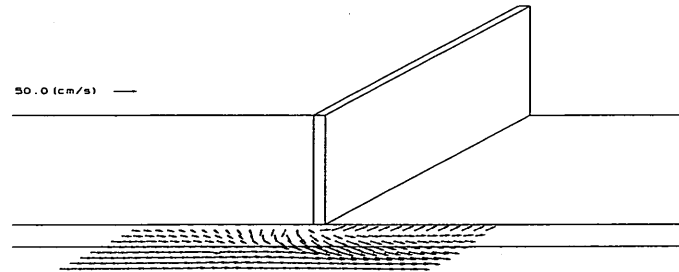


図-17 流速ベクトルの3次元表示 ($z=2$ cm)

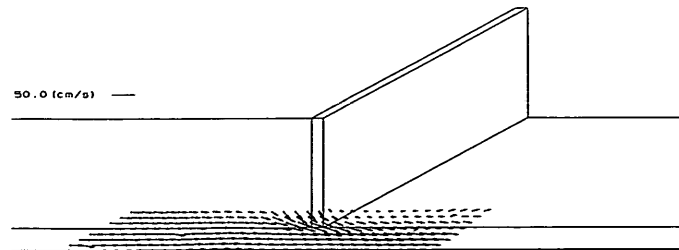


図-18 流速ベクトルの3次元表示 ($z=4$ cm)

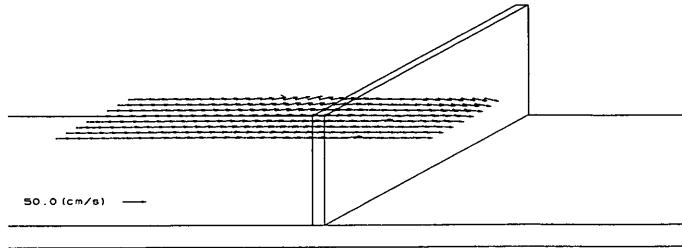


図-19 流速ベクトルの3次元表示 ($z=14\text{cm}$)

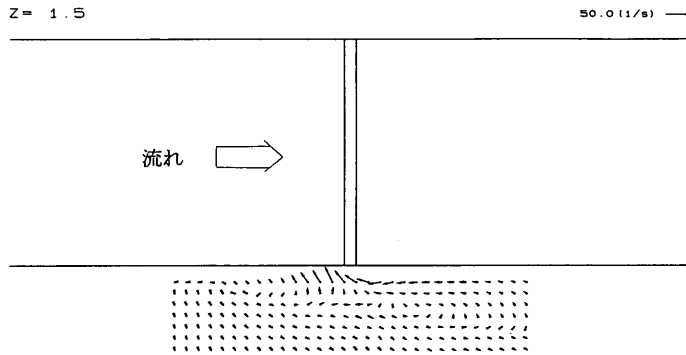


図-20 渦度 (ξ, η) の平面分布 ($z=1.5\text{cm}$)

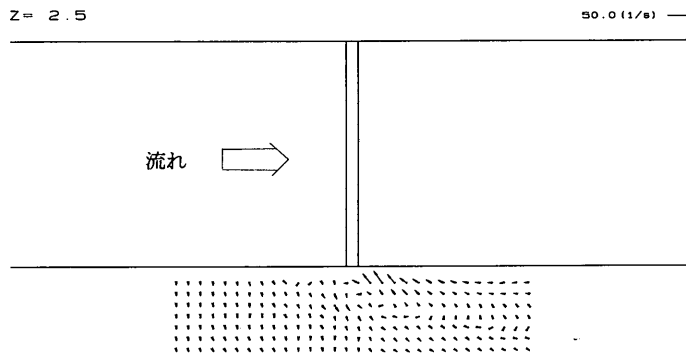


図-21 渦度 (ξ, η) の平面分布 ($z=2.5\text{cm}$)

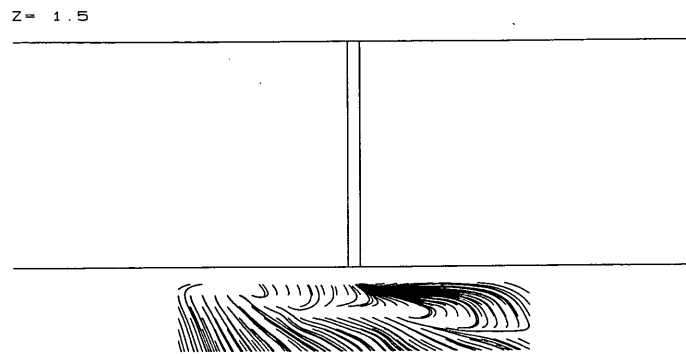


図-22 2次元の渦線の分布 ($z=1.5\text{cm}$)

している。渦度が大きいということは、流体粒子の回転の角速度が速いということである。ただし、ここで示した渦度は平均流速分布を用いて計算されているが、4.1で示したように乱れの瞬間的な変動がかなり大きいので、瞬間的な渦度はここで示したものよりかなり大きくなるものと考えられる。図-21には $z=2.5\text{cm}$ の渦度の分布を示すが、渦度の強い領域は直立部より後流側に移動している。

さらに、渦線について考察する。これは、ある瞬間の渦度ベクトルを接線とする曲線で、ヘルムホルツの渦定理から、

- ・流体粒子は渦線上を移動する
- ・流体中で渦線が変わることはない

ということがわかる。図-22には、 $z=1.5\text{cm}$ での2次元の渦線の分布を示す。計算の出発点を細かく与え、測定範囲からはずれたところで計算をストップした。渦線の方が流体の移動方向を示す。図-7と比べてみると、定性的ではあるが、洗掘が大きいところで渦線が集中している。

4.3 底泥の洗掘機構について

これまで潜堤先端部周辺の底泥の洗掘状況と乱れや渦も含めた流れの場について述べてきたが、ここではそれらの関係について検討する。図-5, 6で示したカオリナイトの洗掘状況と図-13に示した流れのベクトル図を、 $y=1\text{cm}$ の断面で示したのが図-23である。一番上が乱れ強度も含めた流速ベクトル図で、その下の3つが流れを作用させ始めてから2.5時間、3.5時間、4.5時間後の含水比が180%の底泥の洗掘状況である。下の二つは、含水比が190%の底泥の洗掘状況で、上が流れを作用させ始めてから30分後、下が1時間後である。鶴谷他(1990)によれば、回転粘度計で得られる降伏値は含水比が180%で4.4Pa, 190%で3.8Paである。含水比が10%違うだけで降伏値が0.6Paの差であるが、洗掘には非常に大きな違いが見られる。含水比が180%では、流れを2.5時間かけて潜堤直立部の先端部にやっと侵食が見られ、その後4.5時間まで侵食は非常に緩やかに進行する。しかし、含水比が190%になると流れを作用させ始めてから30分後には既にかかなりの侵食が見られ、しかも侵食域の後方では底

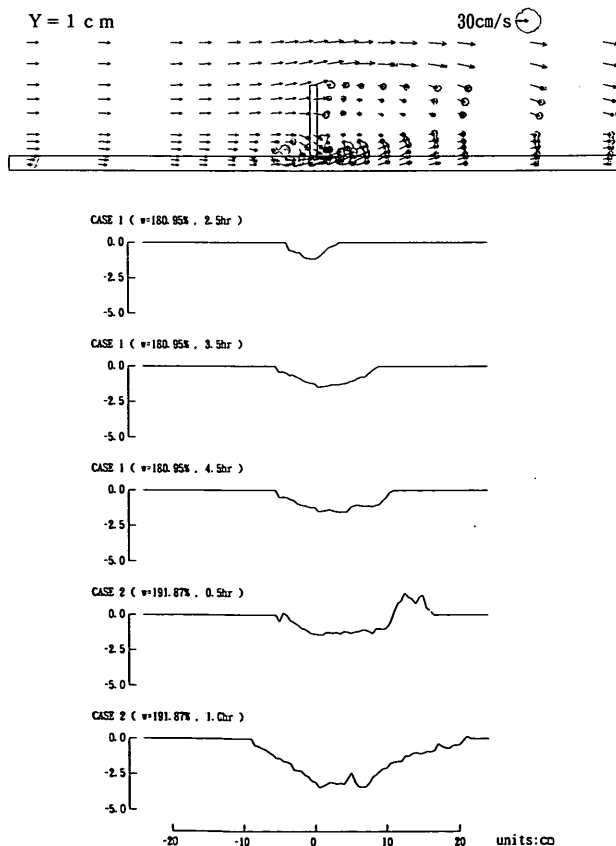


図-23 流速ベクトルとカオリナイトの洗掘の時間変化 ($y=1\text{cm}$)

泥の盛り上がりが見られる。1時間後ではさらに侵食域が急速に広がっている。図-24は潜堤先端から2.5cm離れた位置での洗掘状況で、底面付近の流速ベクトルは侵食域で下方を向いている。全体的な侵食のパターンは図-23とそれほど違ってない。図-25は潜堤先端から8cm離れた場所でのもので、含水比が180%の底泥では4.5時間経っても侵食域はここまで広がって来ないが、190%の場合は、1時間後に潜堤直立部の後流側に洗掘域が広がっている。上の流速ベクトル図によれば、乱れ強度が大きい領域と洗掘域がほぼ一致しているのがわかる。

3.1では、含水比が170%の底泥で、巻き上げに関わる限界せん断応力が0.6Pa程度であることがわかった。このときの回転粘度計で得られる降伏値は6Pa程度なので、巻き上げに関わる限界せん断応力は降伏値の約1/10である。図-23, 24での外力の検討を行う。この場合は流れだけなので、底泥表面に働く主要な外力は乱れによるせん断応力と圧力変動である。図-11(3)が潜堤直立部先端から1cm、底泥面から1cmの位置の流速の測定結果で、図-23に対応する。乱れによるレイノルズ応力は、最大で48Pa

程度にまで達している。ただし、力の作用時間は瞬間的なので、このような大きな力で直ちに底泥表面が破壊するのではなく、このように大きな応力が繰り返し底泥面に作用して、徐々に表面が弱くなり、破壊して侵食していくものと考えられる。時間平均のレイノルズ応力は0.3 Paであり、変動の標準偏差 (standard deviation) は6Paである。図-12は図-24に対応する流速とレイノルズ応力の測定結果であるが、この場合のレイノルズ応力の時間平均値は-1.1Pa (負号は流れの主流の向きと反対に働いていることを示す) であり、標準偏差は9.5Paである。大坪 (1984) は、カオリナイトのような第1底泥グループでは流れによる破壊限界 τ_{c2} が回転粘度計による降伏値にほぼ等しいとしている。しかし、本研究では、洗掘の始まる場所における時間平均のレイノルズ応力は、回転粘度計で得られた降伏値より1桁程度小さい。また、乱れの標準偏差は降伏値と同一のオーダーとなっている。

これまでは、外力としてせん断力を考えてきたが、乱れの大きいところでは乱れに起因する圧力の変動も大きいはずである。そこで、図-12の乱れのデータから、鉛直

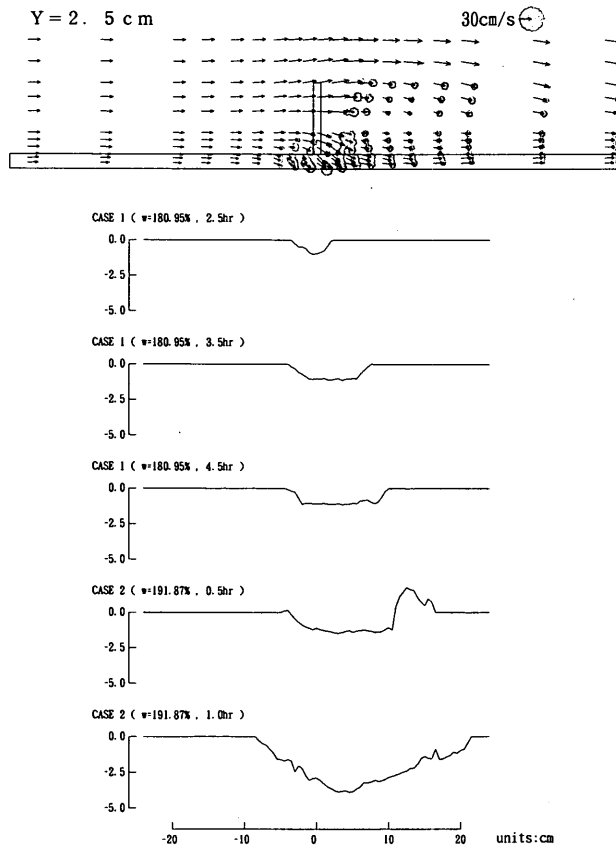


図-24 流速ベクトルとカオリナイトの洗掘の時間変化 (y=2.5cm)

方向の乱れ成分に起因する鉛直方向の圧力変動 $-ww$ を図-26の上段に示す。変動は、瞬間的には -150Pa を越えている。これを水圧に換算すると、約 1.5cm の水深に対応する。実験における水深は 30cm であるから、水深の5%

程度の圧力変動が瞬間的にかかることになる。変動は常に負であるから、底泥面には上向きにかかることになる。圧力は変動がゆっくりであれば底泥面に大きな影響を与えないが、かえって瞬間的な変動の方が底泥面に与える

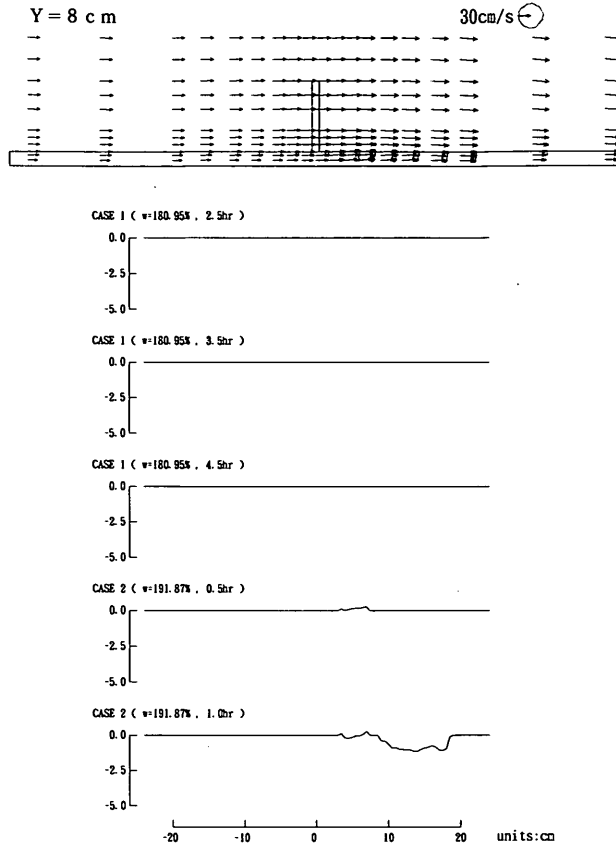


図-25 流速ベクトルとカオリナイトの洗掘の時間変化 ($y = 8\text{ cm}$)

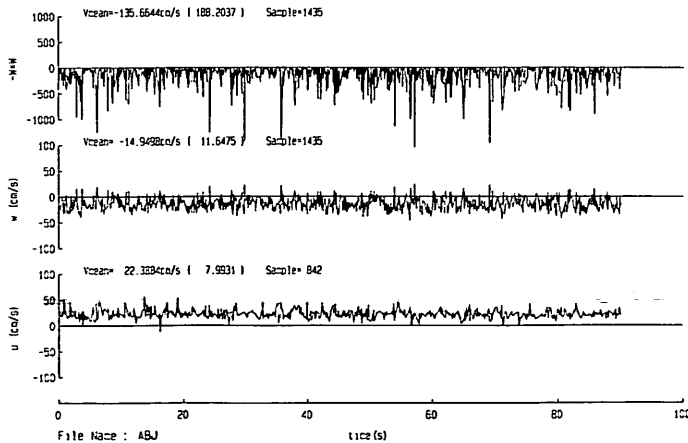


図-26 流れと鉛直方向の圧力変動の時間変化 (測点ABJ)

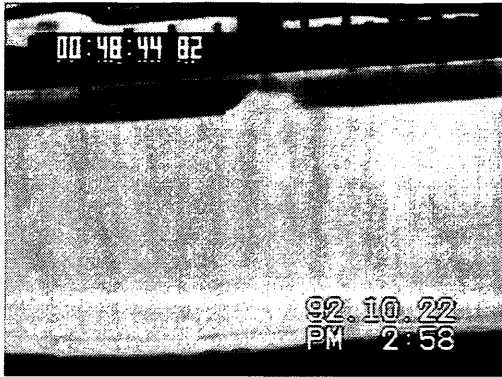
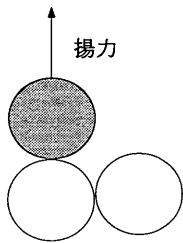


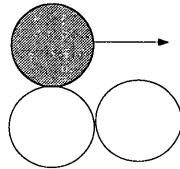
写真-6 底泥面の乱れによる巻き上げ状況

引き剥がす力



浮上離脱

ずり剥がす力



滑動離脱

図-27 初期移動の形態

影響は大きいものと思われる。瞬間的な圧力変動が底泥表面にかかることにより、底泥面内の応力変化によって次第に底泥が柔らかくなり、ついには巻き上げられることになる。写真-6は、底泥面が破壊して、上方に巻き上げられる様子をビデオで撮影した瞬間であるが、破壊面から底泥が舌上に上方へ巻き上げられ、巻き上げられた底泥は固まりとなって下流側へ運ばれていった。これは、上で述べたように乱れに起因する瞬間的な圧力の変動によって、底泥の弱くなった部分が舌上に上へ引っ張りあげられたものと考えられる。

底泥の初期移動の形態としては、図-27に示すように引

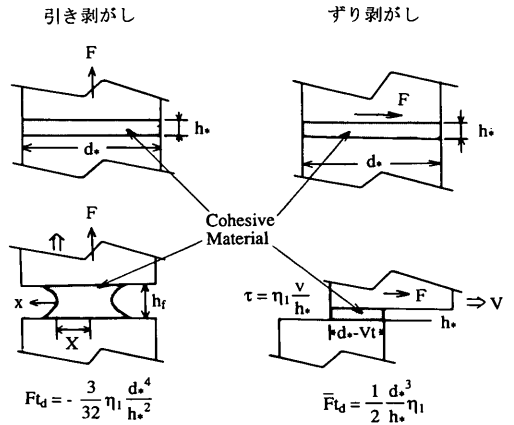


図-28 底泥粒子の離脱過程のモデル化

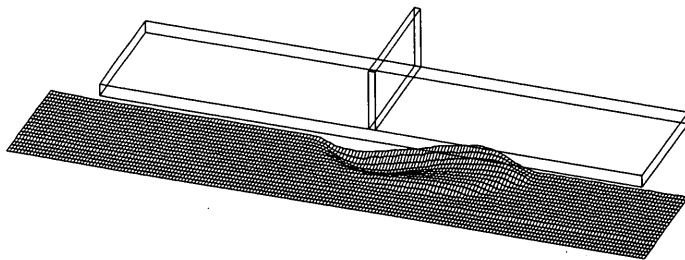


図-29 潜堤先端部の洗掘 (砂, 5分後)

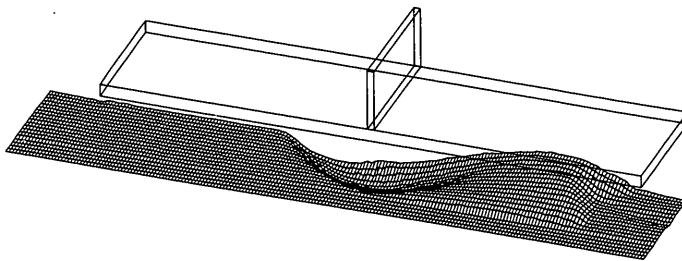


図-30 潜堤先端部の洗掘 (砂, 180分後)

き剥がす力による浮上離脱, そしてずり剥がす力による滑動離脱が考えられる。大坪 (1984) は, 引き剥がしに要する力とずり剥がしに要する力を評価するため, 図-28 に示すように底泥の離脱様式のモデル化を行った。大坪によれば, 引き剥がしに必要な力 F とずり剥がしに要する力 \bar{F} の比を F_* とすると,

$$F_* = \frac{|F|}{|\bar{F}|} = \frac{3}{16} \frac{d_*}{h_*} = \frac{3}{16} \frac{1}{a_*} \quad (11)$$

で与えられる。ここに, $a_* = h_*/d_*$ である。

式(11)によれば, $a_* \leq 3/16 (=0.1857)$ で $F_* \geq 1$ となるので, 引き剥がしに要する力が大きくなる。すなわち, 底泥粒子間に充填された粘着物質の厚さが薄くなるほど, 引き剥がしよりもずり剥がしの方が生じやすくなることになる。

いま, a_* が最も大きくなる球の単純立方充填方式を考えると, $a_* = 0.086$ になり, 式(11)から $F_* = 2.19$ となる。これが 1 よりも大きいということは, a_* が最も大きいと考えられる充填方式においても, ずり剥がしによる離脱の方が起こりやすいことになる。実測による応力 (乱れによるせん断応力と圧力変動) の最大値の絶対値は, 図-12 と図-26 を参考にして, それぞれ $F = 300 \text{ Pa}$, $\bar{F} = 100 \text{ Pa}$ 程度である。これらの値を式(11)に代入すると, $a_* = 1/18 (=0.056)$ が得られる。実際の底泥層を図-28 のように単純にモデル化することに問題もあるが, 本研究の実験条件では図-28 の d_* が h_* の 18 倍以下の状態では引き剥がしが卓越することになる。巻き上げ時の実際の泥の状態をミクロに見ることは不可能であるが, 写真-6 を見る限り巻き上げの初期には引き剥がしが生じていることは十分に考えられる。

このように, 乱れに起因する圧力変動が巻き上げに大きく関わっていることがわかるが, 巻き上げ量の定量的評価と結びつけるためには, 今後底泥の強度の時間的変化や巻き上げの機構をさらに詳細に調べる必要がある。

図-8, 9 に示したベントナイトの洗掘は, カオリナイトとはかなり違った傾向を示した。ベントナイトの場合は底泥面に亀裂やひびは生じず, 潜堤底板に沿う流れの速い領域と乱れの大きな領域で洗掘が顕著になっている。カオリナイトのように明確な洗掘域ができないのは, 大坪 (1984) も述べているようにベントナイトには明確な降伏値が存在しないためであると考えられる。

参考のために, 中央粒径が 1.31 mm の砂 (均等係数 1.64, 曲率係数 0.93) を用いたときの 5 分後の洗掘の状況を図-29 に示す。砂の場合は流れを作用させ始めたときから潜堤先端部に侵食が始まるが, 流れを作用し続けても

侵食域はそれほど拡がらない。図-30 は 3 時間後のものであるが, 1 時間後のものと侵食, 堆積領域にそれほど大きな変化はなかった。底泥の場合は一旦底面から離れると, 流れに乗ってかなり遠方まで運ばれてしまうが, 砂の場合は底泥と違って, 底を移動するため, 斜面のところで上まで登り切れずまた下へ転がり落ちるということを繰り返している。

Shields は, 砂の移動する限界値である限界掃流力を無次元化し, それが砂粒レイノルズ数の $u_{*c}d/\nu$ の関数であることを見いだした (本間・林, 1980)

$$\frac{\tau_c}{g(\rho' - \rho)d} = \frac{u_{*c}^2}{(s-1)gd} = f \left[\frac{u_{*c}d}{\nu} \right] \quad (12)$$

ここに, τ_c : 限界掃流力, d : 砂礫の平均粒径, ρ' : 砂礫の密度, u_{*c} : 限界摩擦速度, s : 砂礫の比重, ν : 水の動粘性係数, f は関数を表す。

砂粒レイノルズ数が十分大きいときには, Shields の式(12) は

$$\tau_{*c} = \frac{\tau_c}{g(\rho' - \rho)d} \doteq 0.06 \quad (13)$$

となる。今回の実験ケースでは, 砂粒レイノルズ数は 220 程度となるので, 式(13)を用いると, τ_{0c} が 12.6 dyn/cm^2 (1.3 Pa) と求まる。図-12 で示したように, 乱れによるレイノルズ応力の時間平均値は 1.1 Pa で τ_{0c} とほぼ等しい。しかし, 瞬間的には 30 Pa を越えているので, 砂は十分動く状態にあるため, 図-29, 30 で示されるような侵食が生じたものと考えられる。

5. 結論

本研究では, 以下に示す結論が得られた。

- (1) 波のみまたは流れのみの場で, 底泥の巻き上げが起こらない場合でも, 波と流れの共存場では, これらの相互作用によって波高が増大し, 底面せん断応力が限界せん断応力を越えると, 底泥は巻き上げを始める。
- (2) 流れの影響が強く, 流れの作用による波の変形が大きくなるような場合には, 局所的な洗掘が起こりやすい。特に逆流の場合, 潜堤周辺の底泥は流れの進行方向に対して潜堤背後で底泥が破壊して洗掘が生じやすくなり, いったん破壊して洗掘始めると粒径の比較的粗い泥の固まりが移動を始め, 潜堤付近まで運ばれて堆積する。この場合には, 潜堤周辺では洗掘が起こらず, 潜堤自体の安定性には問題が少

ない。ただし、巻き上がった底泥が潜堤の直背後に堆積すると、潜堤の有効高さが減少することにもなるので十分な注意が必要である。

- (3) 流速が小さく、流れによる波の変形がそれほど大きくない場合には、底泥表面に働くせん断応力が巻き上げに関する限界せん断応力を越えていれば、潜堤前面、背後ともほぼ一様に巻き上がる。ただし、逆流が小さいために巻き上がった底泥は潜堤の方へは運ばれず、潜堤周辺に顕著な堆積は起こらない。また潜堤周辺で小さな洗掘が起こるので、潜堤の安定性を考える上では長期的な洗掘の傾向を知る必要がある。
- (4) 実際の海域にあてはめて考えると、ケース1,2とケース3,4の波高と平均流速の値を比較して、後者の方がより現実的であると考えられる。つまり、潜堤周辺の底泥の堆積はほとんどなく、潜堤周辺の底泥が洗掘されることが考えられる。今回の実験から、水深3mの場所に高さ1mの潜堤を設置した場合、約一日で潜堤周辺の底泥が10~20cm洗掘されることになるが、底質の相似則についていえば現地の条件を正しく模型に再現しているわけではなく、今後さらに詳しい検討を加える必要がある。
- (5) 潜堤先端部では、流れの乱れが大きくなり、乱れ成分によるせん断応力と圧力の高周波数変動によって底泥が洗掘される。平均的な応力の比較でも、滑動離脱を支配するせん断応力よりも、浮上離脱を支配する乱れによる圧力変動の方が1桁以上大きいことが確認された。
- (6) 潜堤先端部の洗掘では、カオリナイト、ベントナイト、砂とそれぞれに特徴的な洗掘パターンを示した。カオリナイトでは、浮上離脱による洗掘が生じていることを実験で確認した。

6. あとがき

潜堤を設置したことによる周辺の底泥への影響を調べる目的で、流れと波による潜堤周辺の底泥の洗掘・堆積、流れによる潜堤先端部の洗掘について実験を行った。乱れに起因する圧力が、せん断応力より1桁以上も大きく、底泥の強度を低下させて、巻き上げを容易にする。今後は圧力による底泥の強度の変化について調べ、巻き上げ公式の再評価をする必要がある。今回の潜堤先端部の洗掘実験では、熊本港で現在設置されている潜堤と同じタイプの逆T字型の模型を使用し、流れは潜堤に直角に当たるようにしたが、斜めや潜堤直立部に沿う流れでも先

端部の底泥は浸食される場合がある。このような場合についても今後検討をする必要がある。軟着堤のような防波堤の場合には、工事期間が多年度にわたることから、防波堤先端部の洗掘については局所的な流れを考慮して慎重に対応する必要がある。

(1994年3月31日受付)

参考文献

- 1) 大坪国順(1984)：底泥の再浮上機構に関する基礎的研究，京大工学学位論文，138p.
- 2) 小林智尚(1991)：局所洗掘底面上の直立円柱まわりの流れに関する実験的研究，海岸工学論文集，第38巻，pp.446-450.
- 3) 田中 仁・首藤伸夫(1980)：波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験，第27回海岸工学講演会論文集，pp.163-167.
- 4) 鶴谷広一・江口秀二・佐々木豊喜(1990)：流れおよび波による底泥の巻き上げ限界，港湾技研資料，No.674，13p.
- 5) 鶴谷広一・松延嘉國・惟住智昭・柳嶋慎一(1987)：湧昇流を発生させるための水中設置構造物背後の流れと乱れ特性，港湾技術研究所報告，第26巻，第2号，pp.127-169.
- 6) 日野幹雄(1992)：流体力学，469p.，朝倉書店.
- 7) 日野幹雄・孟 岩・村山雅昭(1989)：疎らな流速計測データから非定常流れ場全体の瞬間像を推定する試み，東京工業大学土木工学科研究報告，No.41，pp.1-6.
- 8) 本間 仁・林 泰造編(1980)：続水理学，丸善，322p.
- 9) Van Leussen, W. and J. Dronkers(1988)：Physical Processes in Estuaries: An Introduction, in Dronkers, J. and W. van Leussen (Eds), Physical processes in estuaries, Springer-Verlag, pp.1-18.