

砕波帯における底質の流動化と浮遊について

鶴谷 広一*・惟住 智昭**

1. ま え が き

海岸侵食や構造物の建設に伴う地形変化の検討を行うためには、沿岸域での漂砂機構に関する十分な知識が必要となる。特に、砕波帯内は漂砂現象の最も激しい場所であり、ここでの波と流れ、そしてそれらの複合作用の結果としての漂砂に関する情報を得ることは重要である。これまでに、漂砂に係わる基礎的現象の把握のために、砕波に伴う乱れや、底質の移動機構に関する実験的研究が数多く行われ、現象の解明に寄与してきた。しかし、実験の場合には相似則の問題がまだ残されており、現地への直接の適用が難しい場合も多い。従って、漂砂に関しては現地で生じている現象を直接測定するのが最も望ましいが、厳しい条件下での観測はそれほど簡単ではない。しかし、わが国でもこれまでに現地観測用の施設がいくつか建設され、限られた条件下ではあっても、これを利用して得られた現地からの貴重な情報が蓄えられつつある。漂砂現象の本質を正しく理解するためには、このような現地から得られる正確な情報を蓄積していくことが必要であると考えられる。このことをふまえて、本研究では底質の巻き上げ機構を調べる目的で、漂砂現象の最も激しい場所である砕波帯で現地観測を行った。

最近では、底質の巻き上げ機構に関連して、砕波帯内の流速場の解明が進み、灘岡ら(1987)は斜降渦に代表される大規模渦が砂移動に関連している可能性を報告している。これに代表されるように、海岸工学のこれまでの立場から言えば、流体運動が底質に与える影響を、いわば流体の運動の側からアプローチしていたと言える。一方、土質工学の立場からは、防波堤の沈下等海洋構造物の安定性といった面から、波による底質の液状化がクローズアップされるようになり(例えば、善ら, 1989)、最近の海岸工学講演会でもいくつかの発表がなされている。これらは、波浪による砂層内の応力の変化に着目したもので、波の位相に従って砂層内の内部応力構造が変

化することによって、液状化が起こる場合があることを指摘している。この場合は流体の運動(流れや渦)は考えずに、波による圧力の変動の影響を砂層側からアプローチしたものと言える。

もし液状化が起こると、この状態での砂は拘束力がなくなり、非常に動きやすい状態となる。このことから、波の場での砂移動の機構を考える場合でも、液状化が起こるかどうかは非常に大きな問題となる。

ここでの観測の主要な目的は、これまで砂の移動に直接かかわると言われてきた、砕波によって生じる乱れをできるだけ正確に測定することである。そして、底質の砂が巻き上がるのは、従来から言われている水の運動(大規模渦等による乱れ)のみによるのではなく、むしろこれまで見過ごされていた波動運動が引き起こす底質(砂層)の液状化も大きな役割を果たしていることを、示すことにある。

2. 観 測 方 法

現地観測は、茨城県の鹿島灘に設置された運輸省の波崎海洋研究施設(以下“HORF”と称する)で、平成元年10月23日～10月27日(以下第1回観測とする)と、平成2年1月9日～12日(第2回観測)に実施した。HORFの概略図と、これに沿った海底の地形図を、2回の観測時について図-1に示す。岸から145mの位置にあるラダーに各種の観測機器を固定して水中に設置した。ラ

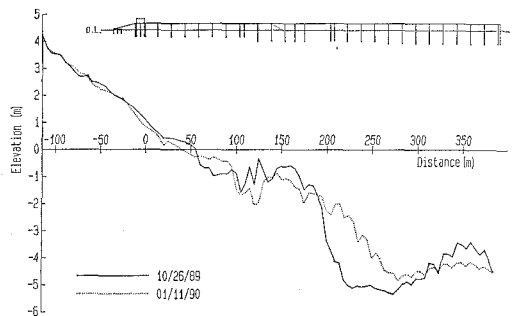


図-1 HORFと観測時の海底地形

* 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

** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

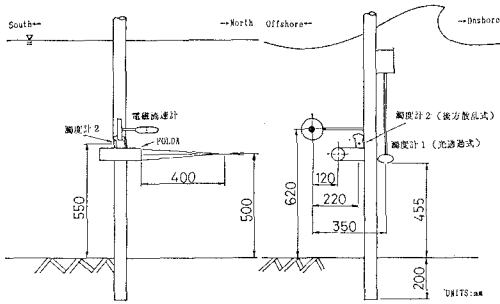


図-2 第1回観測時の機器の設置状況

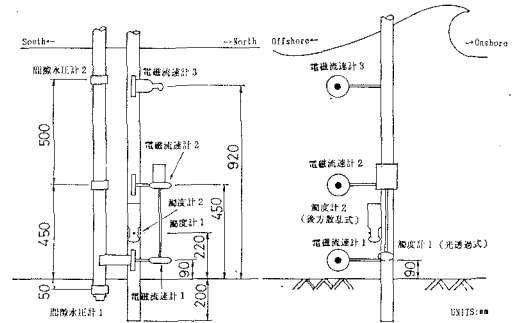


図-3 第2回観測時の機器の設置状況

ダーの位置は、図-1 の上の栈橋の断面図の中央よりやや左側に斜線で示されている。この位置での水深は、観測時には 1.6m から 1.2m 位の間であった。第1回観測の測定機器の設置状況を図-2 に示す。ただし、水面の位置は適当に書いてある。砕波によって生じる乱れを測定するために、2成分光ファイバー・レーザー・ドップラー流速計 (FOLDA, 出力 5W) を海底面から 50 cm 上方に設置した。FOLDA のプローブの直径は 6 cm で、焦点距離は 40 cm であり、後方散乱方式を採用している。灘岡ら (1988) は、前方散乱方式の現地用 LDV を用いた観測を行っている。前方散乱方式では、散乱光の強度が後方散乱方式より 100 倍程度大きいので、信号処理の面からはかなり有利であるが、光源と受光部を相対して設置する必要がある、プローブの形状が複雑になりやすく、流れを乱す可能性が大きい。その点、後方散乱方式は光源と受光部が一つのプローブに納まるので、流れを乱す可能性は少なくなる。しかし、散乱光の強度がかなり弱くなるので、以下の対策を考えた。

1) 大パワーのレーザー光源を使用して、散乱光の強度を大きくする。

2) 散乱光のドップラー周波数を出来る限り精度良く検出する。

1) については、最大出力 5 W の Ar レーザーを用いた。このクラスのレーザー光源は 3 相 200 V の電源と冷却水を必要とするが、電源については工務用発電機を用い、冷却水は HORF の井戸水を使用した。2) については、散乱光のドップラー周波数をきわめて高精度に検出できる Burst Spectrum Analyzer (BSA) を用いた。BSA は、従来からのトラッカータイプやカウンタータイプと違い、バースト信号の主要部分を FFT 変換してドップラー周波数を求めるものであり、信頼性が大きく向上している。また、電磁流速計をレーザー流速計の近くに設置した。

第2回目の観測では、主として砂層の液状化と巻き上げの関係を調べるために、間隙水圧計を海底面から 5 cm 下と海底面から 95 cm 上の 2 カ所に設置した (図-

3 参照)。第1回、第2回目 共砂の巻き上げの判定のために、光透過式と赤外後方散乱方式の濁度計を用いた。

3. 観測結果

(1) FOLDA による流速測定

図-4 に、水平 (岸沖方向) 流速 u 、鉛直流速 w 、浮遊砂の濃度 C の変化を示す。このときの砕波位置はほぼ観測地点に一致していて、砕波した時はかなり気泡を含んで白濁した状態であった。図中の流速で、実線は電磁流速計によるもの、丸印は FOLDA によるものである。水平流速は岸向き、鉛直流速は上向きを正としている。図-2 に示したように、両者は水平と鉛直方向にそれぞれ 12 cm ずつ離れているけれども、測定値は比較的良好に一致している。さらに、FOLDA は細かい乱れをよくとらえているが、それほど大きな乱れ成分はなく、特に u 成分では、波動運動にともなう流速変動成分が卓越していると考えられる。図-4 の下段は浮遊砂の濃度であるが、この濃度が高いときに FOLDA ではデータの欠落が目立つ。また、砂が巻き上がるのが斜降渦等の影響であれば、流速の測定値の中に強い乱れが認められてもよいはずであるが、今回のデータの中では顕著な

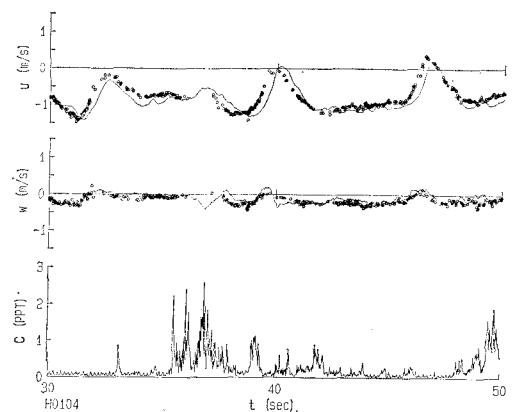


図-4 第1回観測の流速と浮遊砂濃度

乱れは観測されなかった。ただし、斜降渦のような大規模渦は極めて3次元性の強い現象であり、今回は沿岸方向の水平流速を同時に測定していないので、今後さらに詳しい測定が必要である。

(2) 底質の液状化の検討

善ら(1989)によれば、海底面下の任意の深度における有効鉛直応力 σ_v' は次式で与えられる。

$$\sigma_v' = \sigma_{v0}' + (p_b - p_m) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 σ_{v0}' は静穏時の有効土被り圧、 p_b は海底地盤表面に作用する水圧の変動量、 p_m は海底地盤中の変動間隙水圧である。有効土被り圧を計算する際の砂の水中単位体積重量の値は善ら(1989)と同様に 0.969 gf/cm^3 を用いた。

液状化の発生条件は、

$$\sigma_{v0}' \leq -(p_b - p_m) \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。

図-5 に第2回観測の測定結果の一例を示す。一番上が p_b で、これは図-3 に示した間隙水圧計2の測定値から、微小振幅波を仮定して換算した。2番目は海底面下5cmでの変動間隙水圧 p_m 、3番目は水位変動である。一番下は、光透過式で測った浮遊砂の濃度である。下から2番目と3番目はそれぞれ電磁流速計2で測った水平流速(岸向きを正)と鉛直流速(上向きを正)である。その上は、流速変動から求めた瞬間レイノルズ応力で、結局一つの流速計について3つがまとまったデータである。その上の3つのデータが流速計3のものである。一番下の濁度計の出力が高い時は、図中に縦線で示したように、波の峰の通過した後(上から3番目参照)であるのがわかる。Madsen(1974)は、砕波に近い状態の波の峰が通過する直前に、底質の砂が巻き上がるのを他の研究者が潜水中に目撃したと述べているが、これは表現上の違いで、砂は波の峰と峰の間で巻き上がるというのが妥当であろうと思われる。図-5の180秒過ぎでは、瞬間レイノルズ応力が大きくなっているが、140, 155, 160秒あたりではそれが見られない。これは、砂の巻き上げについて海水の運動だけではなく、他の要因についても考える必要があることを示唆している。ただし、現地は3次元的な現象が支配的で、他の地点で巻き上がった砂が移流によって運ばれてくる可能性もあり得る。

図-6 は、 p_b と p_m のコヒーレンスと位相差を示したもので、ピーク周波数(0.07 Hz程度)で p_m は p_b に対して30度程度の位相の遅れがある。この位相の遅れと振幅の減衰の程度によって、式(2)の液状化の発生条件が決まることになる。

図-7 と 8 は、測定結果と液状化に関する解析例をまとめて示したものである。上から水面変動 η 、浮遊砂の

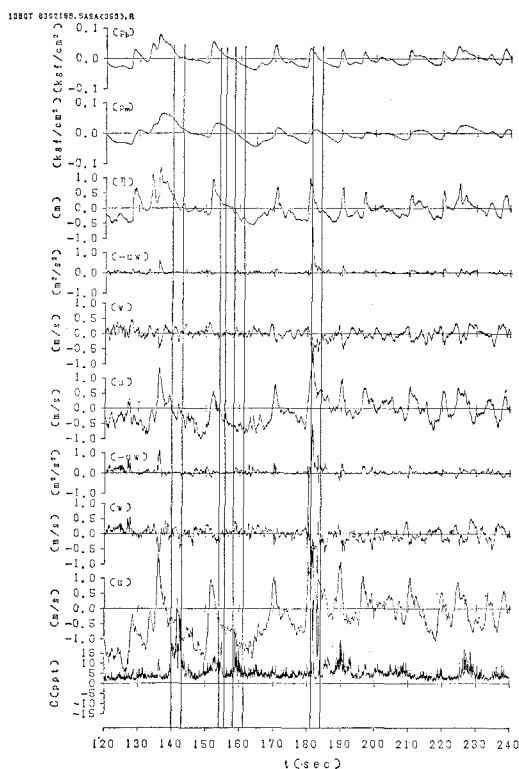


図-5 実測データ例(第2回観測)

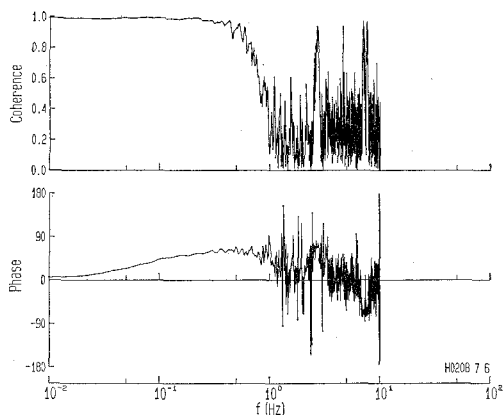


図-6 p_b と p_m のコヒーレンスと位相差(度)

濃度 C (光透過式を太い実線で、後方散乱式を細い実線でまとめて示した)、Darcy の法則から求めた浸透流速 w_b 、液状化の判定に用いる砂層の有効鉛直応力 σ_v' 、海底面に作用する水圧の変動量 p_b と海底地盤中の変動間隙水圧 p_m 、そして海底面上9cm上の岸沖方向流速 u (岸向きを正)と鉛直方向流速 w (上向きを正)である。図-8 は、図-5 と同じデータを用いている。

図-6 で明らかになったように、 p_m は p_b に対して

約30度遅れているが、時系列データで比較した図-7と8の下から2段目にそれをはっきりと表れている。しかも、波の山から谷へ向かうところでその振幅も逆転している。この差と有効土被り圧との大小関係で、式(2)から砂層が液状化するかどうかの判定が出来る。上から4列目の有効鉛直応力 σ_v' が負の場合に砂層は表層付近で液状化していることを示している(黒く塗りつぶして

ある部分)。この状態での砂は拘束力がなくなり非常に動きやすい状態にあるので、巻き上がりやすくなる。図-7, 8の上から2列目の浮遊砂の濃度も、この液状化の起きているときに大きくなっていることが多い。ただし、図-7, 8の一番下の流速データを見ると、水平流速 u には長周期の成分が認められ、平均流速が負(沖向き)のときには濁度計の出力が小さくなる傾向があ

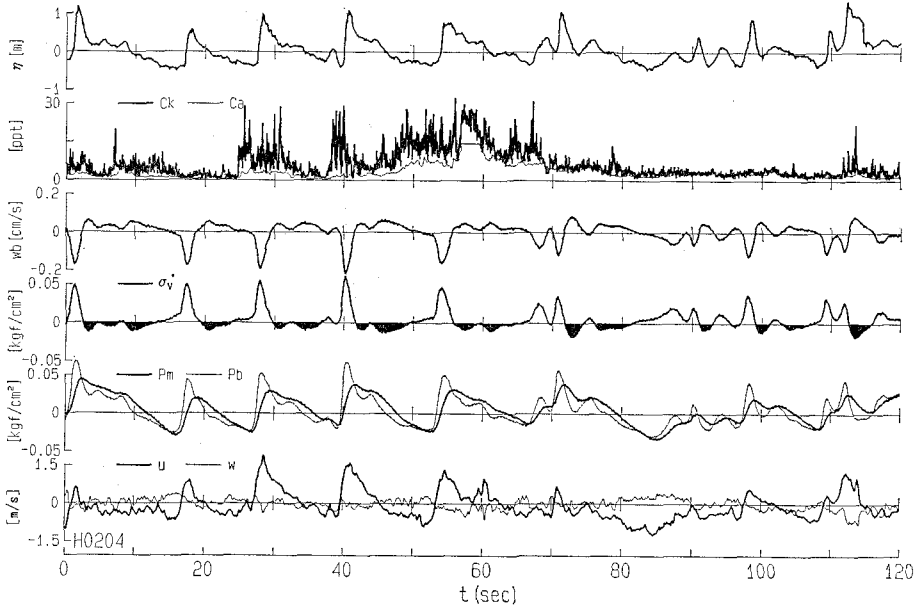


図-7 実測データと液状化の解析結果(第2回観測, その1)

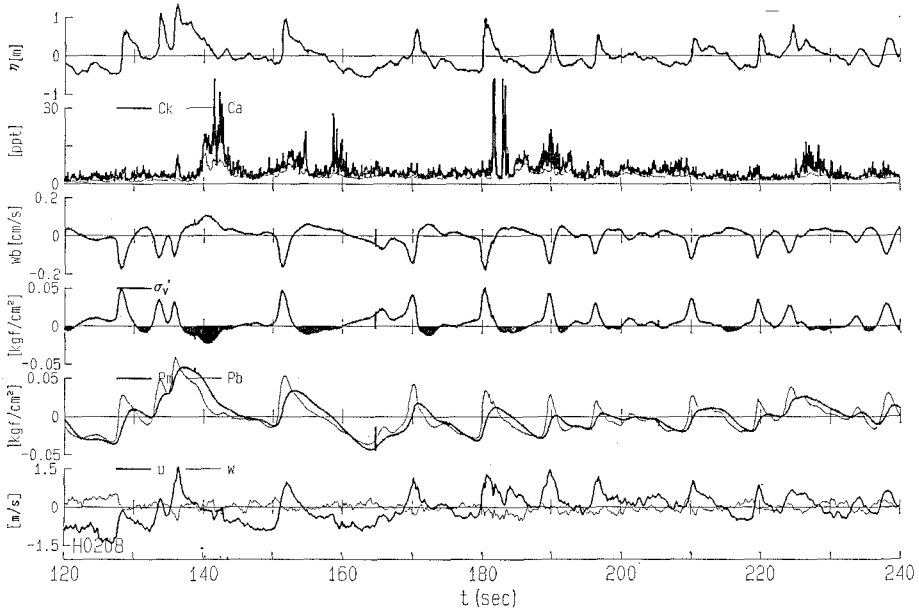


図-8 実測データと液状化の解析結果(第2回観測, その2)

る。これは、図-3 に示した濁度計の位置と、砂の巻き上がる位置との関係で、流速の方向によっては巻き上がった砂を検出できないことがあるためと考えられる。さらに詳しく見ると、液状化の起こるのは波の峰が通り過ぎて急激に水圧の小くなる時である。すなわち、砂の移動は波の位相と密接に結び付いている。特に、砕波帯では水面の変動速度が大きいので、波の峰が通り過ぎた後の海底面の急激な圧力減少に砂層内の圧力変化が追従できず、過剰間隙水圧が発生しやすくなっているものと思われる。逆に、波の峰付近では、上から下への応力がかかっていることになる。結局、砕波点近傍の底質は、波の変動にともなって圧縮と液状化を繰り返していることになる。

砂層内の浸透流速 w_b は以下のようにして計算した。下向きの浸透水圧を j とすると、

$$j = \frac{\partial(p_b - p_m)}{\partial z} = - \frac{\partial p_m}{\partial z} \dots\dots\dots (3)$$

となる。

砂層内の流速を v とすると、Darcy の式は、以下のように表せる。

$$v = ki \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 k は透水係数、 i は動水勾配である。

式 (3) の浸透水圧と、動水勾配には次の関係がある。

$$j = i\gamma_w \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 γ_w は水の単位体積重量である。

海底面から 5 cm の間で浸透水圧が一様に変化すると仮定し、透水係数を 2×10^{-4} m/s としたときの砂層内の浸透流速を w_b として示したのが、図-7 と 8 の上から 3 番目である。

河田・Larsen (1984) は、漂砂の移動限界に及ぼす吸水の効果を検討し、砂粒の沈降速度の 1/100 程度の吸水速度でも、非常に効果がある場合があることを示している。逆に、吹き出し速度がある場合には、漂砂の移動限界に及ぼす効果が更に大きくあらわれるとも述べている。こうしたことから、砕波帯における砂の巻き上げには、砂層の液状化（あるいは浸透流）が大きく関係しているものと考えられる。

4. 結 論

現地観測の結果から以下のことが明らかとなった。

1) 2 成分光ファイバー・レーザー・ドップラー流速計 (FOLDA) が、現地で十分使えることを確認できた。ただし、浮遊砂濃度が高くなると、データの欠落がみられる。今回の観測では、数 ppt の砂の濃度でデータの欠落が顕著になった。

2) 岸沖方向と鉛直方向の流速の同時測定結果から、波の変動程度以上の高周波数の強い乱れは今回ははっきりと認められなかった。

3) 砕波帯においては、波形の急激な立ち上がりと減少のために、海底の砂が圧縮と液状化を繰り返していることを見出した。砂は、波の峰の通過後に液状化しやすく、この時に砂が巻き上がることを示した。

謝 辞

本研究における現地観測の実施には、港湾技術研究所水工部漂砂研究室の加藤室長を始めとする漂砂研究室の方々に大変お世話になっている。また、同所土質部動土質研究室の善室長には液状化と浸透流の計算に際して多くの御助言をたまわった。さらに、三洋水路測量 (株) からは、現地観測用の間隙水圧計を借用した。

数回にわたる現地観測の実施とデータ整理では、海洋水理部水理研究室の江口元研究官と、鷹濱、佐々木の両研究員の手を煩わせた。ここに記して心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 河田恵昭・L. H. Larsen (1984): 漂砂の移動限界に及ぼす吸水の効果, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 267~271.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰 (1989): 海底地盤の波浪による液状化—現地観測および解析—, 港湾技術研究報告, 第 28 巻, 第 3 号, pp. 29~57.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987): 砕波帯内の三次元的大規模渦構造と浮遊砂の現地観測, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 21~25.
- 灘岡和夫・八木 宏・増田幹雄・上野成三・村本龍夫 (1988): フィールド用 LDV の開発による現地砕波帯流速場計測の試み, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 49~53.
- Madsen, O. S. (1974): The stability of a sand bed under the action of breaking waves, MIT Report No. 182, 75p.