

離岸堤による海岸変形について

——二次元の場合——

中村 充*・大西 亮一**・宮村 長生***

1. 序

近年わが国の海岸は海岸工事や河川における砂利の採取、ダム建設などに起因して侵食海岸が増大している。このために海岸堤防は強大な波力と洗掘を受け、防災上問題がある。一方水産の立場から見ると干潟や汀線近くの砂浜海岸はエビ、貝類、その他魚貝類の稚仔の育成の場である。しかしながら海岸工事や侵食のためにこれらの場が失われる状態にある。他方資源培養型漁業による水産開発は稚仔の人工孵化とその稚仔を自然海へ放流するための放流場中間育成場が必要である。この考えから水産における浅海開発の研究では現在クルマエビの人工放流場（人工干潟計画と称し、稚魚の苗代に当たる）の造成実験を実施しつつある。

このような観点から砂浜海岸における前浜をコントロールし、保全する工法の研究を始めた。本研究ではまず海岸線に直角方向の砂移動対策として暴風海浜を離岸堤によって安定化する工法を検討した。

いま砂浜海岸と波の関係についてみると Johnson¹⁾ は海岸形状と波形勾配に注目して沿岸砂洲の発生限界を示した。岩垣・野田²⁾ は Johnson の研究をより発展させて波形勾配の他に底質粒径の影響を明らかにした。一方、細井・荒川³⁾ は Sand bar を固定した場合の海岸変形を篠原・椿⁴⁾ の掃流砂関数と粒径の関係で論じ、浮流形式の場合には侵食型、掃流形式の場合には堆積型となることを示した。これによって Sand bar 型海浜は必ずしも侵食型であるとはいえない。

一方離岸堤による侵食防止工法についてみると、Sauvage・Vincent⁵⁾ は離岸堤の長さを研究し、トンボロの発生限界を明らかにした。豊島⁶⁾ は離岸堤の高さについて、現地調査の結果から離岸堤の高さは高いほど有効であるとしているのに対し、永井・久保⁷⁾ は模型実験の結果から離岸堤はむしろ低くして沖の砂を岸側へ運び込む効果を期待すべきだとしている。

一方離岸堤による侵食防止の機構について考えれば、杉江・川口・大島⁸⁾ の研究から岩垣・野田²⁾ の研究成果を使って、Steep な波を Flat な波に変換することが考え

られる。この場合には離岸堤の消波機構が問題となる。中村・白石・佐々木⁹⁾ は離岸堤上の碎波が主因となることを明らかにした。一方堀川・小森¹⁰⁾ は周波数応答関数を使って解析した結果から潜堤が一種の波起しの役目をしているといっている。R. J. Byrne¹¹⁾ は Sand bar により 2 次の波が発生することを観察している。中村・佐々木・大西¹²⁾ はエアーカーテンによる消波機構を研究し、エアーカーテンの仮想質量による慣性によって反射が起こることを明らかにした。これらの結果から離岸堤による消波は反射も大きな因子と考えられる。このため離岸堤による消波は Steep な波ほど有利となり、侵食防止には好都合である。しかしながら、これらの成果が適用できるのは波が碎波する以前であるために離岸堤を碎波点より沖に設置した場合であって碎波点より岸側では議論できない。また現地調査の結果から汀線近くの離岸堤でも有効な例があり、これらについては説明できない。

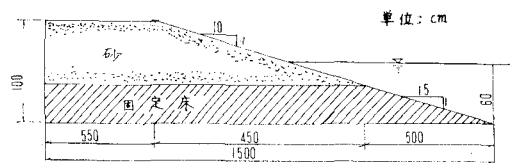
以上の考えから著者は Sand bar の特性に注目して離岸堤を碎波点より岸側に設置した場合の設置位置の影響を実験的に検討したのでその結果を報告する。

なお、有益な助言を得た高知大学 上森教授にお礼申し上げる。

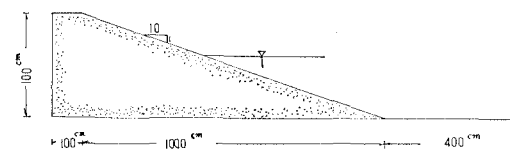
2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

実験には長さ 15m、幅 0.6m、深さ 1.0m の水路 8 本にフラップ型の造波機（周期 1.0~3.0 秒、最大波高約 35cm）を取り付けて用いた。水路底は図—1 と 2 に示すように固定床がある場合とない場合について検討した。



図—1 水槽初期形状（固定床がある場合）



図—2 水槽初期形状（固定床がない場合）

* 正 会 員 農林省農業土木試験場
 ** 正 会 員 同 上
 *** 学生会員 東海大学学生

砂浜形状の時間的変化の測定には測定台車の基準点と砂面の間を物さして測定する方法を用いた。波高と波形は超音波波高計で計測して、多ペンXYレコーダーで記録した。水路内の水位はあらかじめ水路壁に取り付けたマノメーターによって測定し、常に一定の水位となるように調節した。

(2) 実験条件

実験砂は粒径と比重の影響を見るために図-3に示す

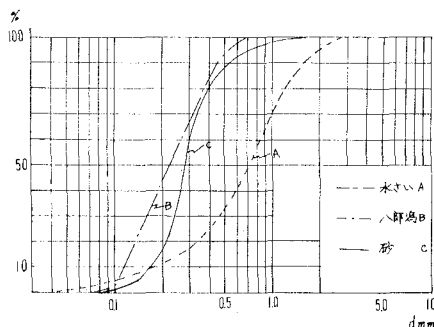


図-3 粒径加積曲線

3種類の砂を用いた。砂の比重はA(水さい)が2.78であるが沈降速度から求めたみかけの真比重は1.30となる。B(霞ヶ浦の砂)とC(相模川の砂)は2.68である。離岸堤は堤頂がちょうど静止水面となるように玉石、砂利、コンクリートブロックで設置した。この場合、砂床上に離岸堤の底面積に等しい面積に0.5mm厚さのビニールを敷き沈下を防いだ。

実験の諸元は表-1に示す。実験は全部で138ケースについて行なった。

表-1 実験条件

因子	実験条件
水深 (cm)	60 cm
周期 (秒)	1.5 1.7 2.0 2.2 2.5 2.7
波高 (cm)	6~36.6
初期勾配	1/5 1/10 1/15 1/20
離岸堤	無・有(岸から1.0, 3.0, 5.0, 7.0 m)
砂	A, B, C (図-3 参照)

(3) 実験方法

実験は図-1, 2に示すように一様な勾配の砂浜形状を初期条件として波をおこし、砂浜の時間的変化を記録した。測定時間は1, 5, 10, 20, 30, 40時間後で、測定間隔は水路の中央を20cm間隔に測定した。この測定記録をグラフ化して変化の状態を見れば砂の移動方向が明らかとなる。海岸の侵食と堆積の判断は汀線の前退・後退によって判定した。波高は水路の入口で測定し、微小振幅波理論によって沖波に換算した。波の変形および伝播

速度は2台の波高計を用いて、1台を水路の入口に固定し、他の1台を順次移動して同時記録し、その伝播時間の遅れから波速を計算した。波の変形については目視観察も併用した。離岸堤による侵食防止のための位置の決定は離岸堤をあらかじめ定まった位置に設置し、種々の波をあてて海浜の砂移動形態の時間変化が侵食か堆積かを判定して解析した。

3. 実験結果

(1) 海岸の形状におよぼす波の特性

砂浜海岸の形状はJohnson¹⁾によれば、暴風海浜と平常海浜である。著者の実験結果は図-4に示すように5

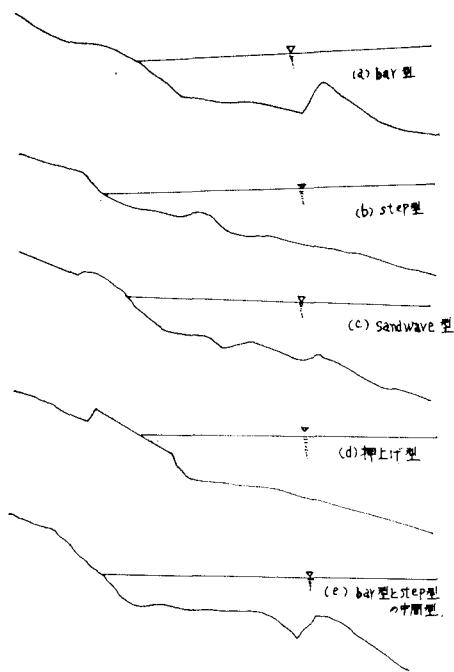


図-4 沿岸断面形状

種類が観測された。Sand bar形とStep形はJohnsonと同じであるが、その他のSand wave形は比較的波が小さく、底質粒径が小さい場合に観測され、砂の流れは常に沖側であった。しかし、この形状は時間とともにSand bar型かStep型のどちらかへ移行しており過渡的な状態といえる。押上型は固定床でA(水さい)の場合に観測された。

次に岩垣・野田²⁾の方法にしたがって沿岸砂洲の発生限界を図-5と6に示す。この結果、初期形状が1/5を除いて満足している。一般に暴風海浜はSand bar型で侵食型。平常海浜はStep型で堆積型といわれている。そこで実験結果の20時間後から30時間後の間の変形が侵食か、堆積かを見て図-7と8にプロットした。この結果からSand bar型は必ずしも侵食型とはいえないことがわかる。

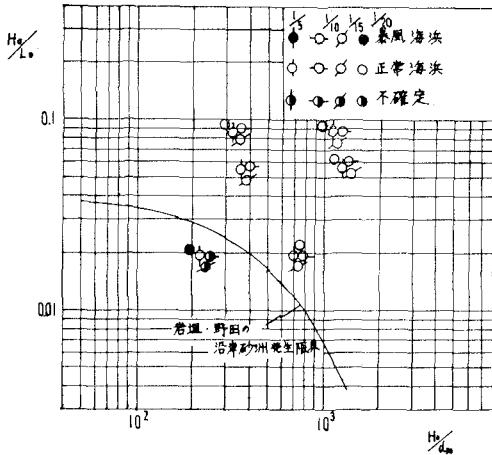
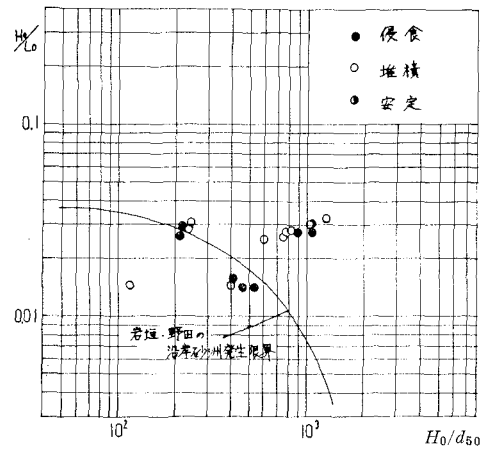
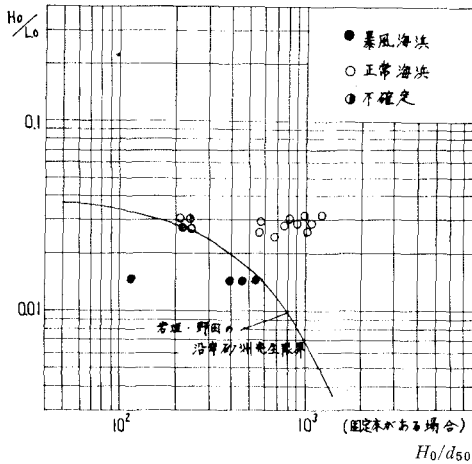
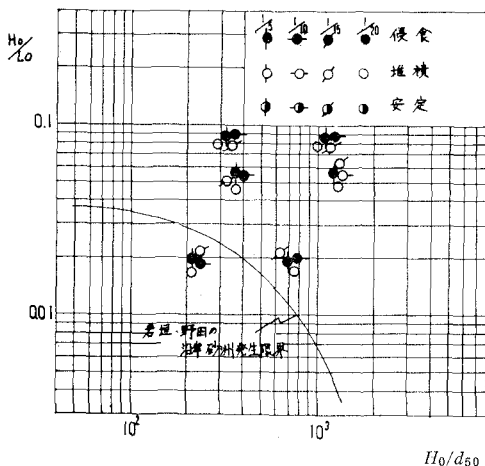


図-5 沿岸砂洲の発生限界

図-8 波による海岸変形
(固定床がある場合)
(20~30 時間の変形)図-6 沿岸砂洲の発生限界
(固定床がある場合)
(初期勾配 1/10)図-7 波による海岸変形
(20~30 時間の変形)

(2) Sand bar の特性

Sand bar とはいったい何なのか、という疑問からその性質を調べた。まず Shepard や Keulegan にならって Sand bar の規模を図-9 に示す。この結果は各測定時間におけるすべての値をプロットしたもので、Sand bar の発達過程も含まれている。この結果からは侵食と堆積の区別はない。

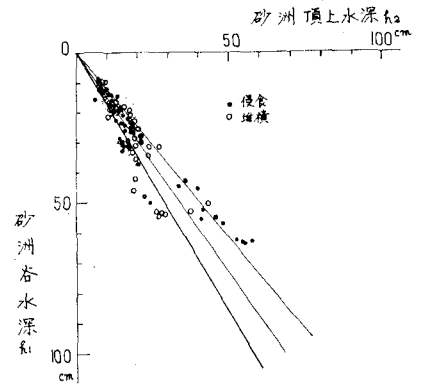


図-9 沿岸砂洲の規模

次に砂浜形状の時間的な変化の一例を図-10 に示す。この結果、Sand bar は最初発達しながら沖へ移動する。この間汀線近くは侵食型である。そして Sand bar が止まると逆に堆積型に変わることがわかる。次に発達した Sand bar を取り除いた状態を図-11 に示す。この結果、侵食型となり、Sand bar は発達し始めることがわかる。次に、Sand bar のかわりに同じ高さの離岸堤に変えると図-12 に示すように変化がみられない。この結果から Sand bar の移動は海岸の地形に大きな影響をもっているといえる。

(3) 砂浜変形におよぼす因子について

前節までは形状的な特性を見てきた。この結果から砂浜形状の変形におよぼす因子について考えてみる。まず波の特性として波高 (H)、波長 (L)、周期 (T) がある。次に底質の特性として密度 (σ)、粒径 (d) がある。

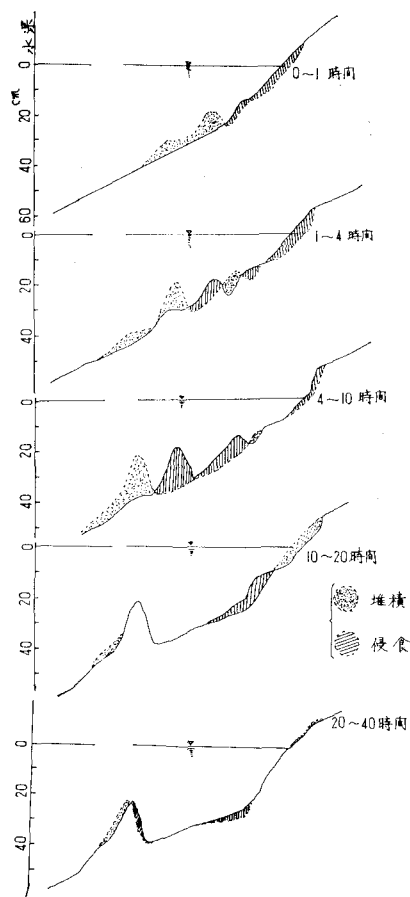


図-10 砂浜形状の時間的変化

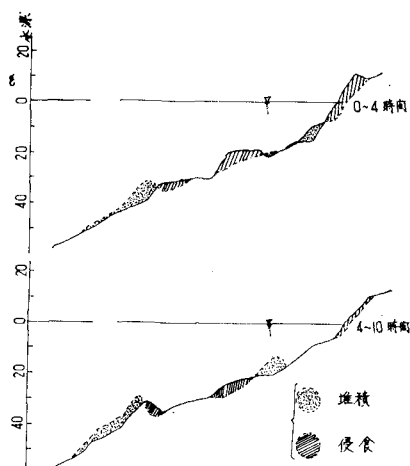


図-11 Sand bar を取りのぞいた場合の砂浜形状の時間的変化

底勾配の特性として水深 (h) と距離 (X) が考えられる。

ここで海浜の砂移動形態を観察すると最初Bore状の波の乱れで浮遊して岸に運ばれ、沈降しながら乱れの少ない流れでもどされる状態がわかる。これから考えて当然

波による拡散の問題と考へたい。この場合に拡散係数は不明であるが、底質粒径 (d) と密度 (σ) は沈降速度 (w_0) の代表とみることができ。また、砂の汀線直角方向移動量に關係する因子として波速 c

図-12 Sand barを離岸堤で置き変えた場合の砂浜形状の時間的変化

て海岸の変形に影響する因子として

$$f(H, L, T, h, X, w_0, c) \dots\dots\dots (1)$$

となる。この因子に対する無次元量は、

$$f_1\left(\frac{H}{L}, \frac{X}{L}, \frac{h}{X}, \frac{h}{w_0 T}, \frac{X}{c T}\right) \dots\dots\dots (2)$$

となる。一方、 H/L は岩垣・野田²⁾にならって沖波波形勾配 H_0/L_0 で代表させることができる。しかし、図-7, 8 より侵食と堆積には影響は明確でない。そこで關係する項としては、

$$f_2\left(\frac{X}{c T}, \frac{h}{w_0 T}, \frac{h}{X}\right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで h/X の項は、 $X/(c \cdot T) \sim h/(w_0 T)$ の關係の中に含まれているものと考えて省略する。また波速 (c) はBore 状の波速を考えなければならないが、まず第1段階として、碎波の波速 V_0 で代表させるものとして孤立波理論の第1次項で

$$c = V_0 = \sqrt{gh_b \left(1 + \frac{H}{h}\right)} = \sqrt{1.781gh_b} \dots\dots\dots (4)$$

沈降速度は

$$w_0 = \left\{ \frac{4}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \frac{g}{c_b} d \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

で計算するものとするれば

$$f_3\left(\frac{X}{V_0 T}, \frac{h}{w_0 T}\right) \dots\dots\dots (6)$$

となる。式 (5) の X と h を Bar の位置と谷水深 (h_1), 頂上水深 (h_2) で代表させて整理した結果 図-13 と 14 となる。図-13 と 14 の結果は 1, 5, 10, 20, 30, 40 時間後のすべての状態を一つのグラフ化したもので一般の海浜の変形を論ずる上で有効と考えられる。

(4) 砂浜の侵食防止に対する離岸堤の位置について
離岸堤を砂浜に設置すると 図-15 に示すように明らかな効果がみられる。いま実験波の条件は 図-16 に示

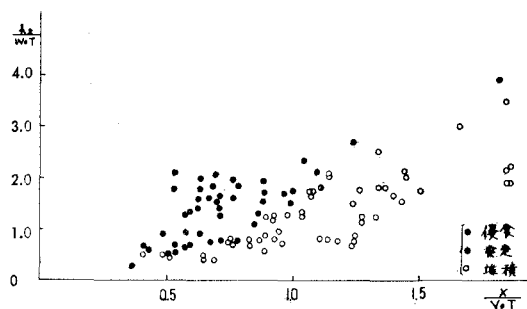


図-13 Sand bar に対する
 $\frac{h_2}{w_0 T} \sim \frac{X}{V_0 T}$ の関係

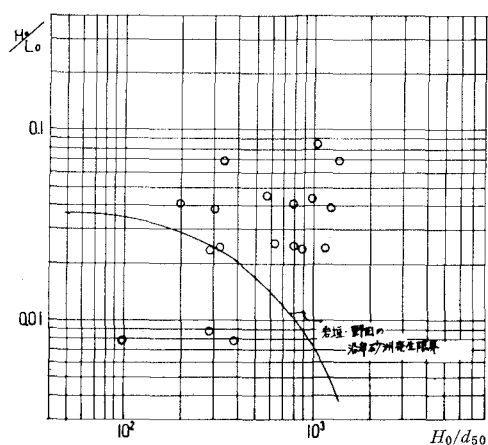


図-16 離岸堤に対する沖波と底質粒径の条件

す値について、離岸堤の位置を汀線から 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 m にて実験した結果を式 (6) の水深 (h) を離岸堤設置水深 (h_1), 距離 (X) を汀線から離岸堤までの距離で代表させて整理すれば 図-17 となる。

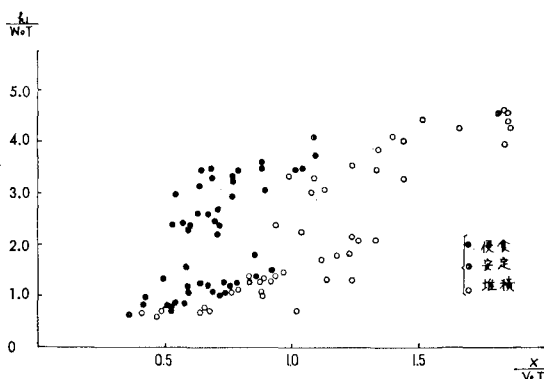


図-14 Sand bar に対する
 $\frac{h_1}{w_0 T} \sim \frac{X}{V_0 T}$ の関係

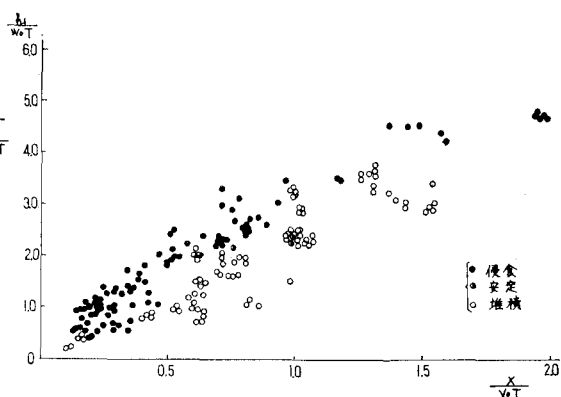


図-17 離岸堤に対する
 $\frac{h_1}{w_0 T} \sim \frac{X}{V_0 T}$ の関係

4. 考 察

(1) 砂浜変形におよぼす波の影響

砂浜海岸の形状と波の関係は Johnson¹⁾, 岩垣・野田²⁾の研究によって $H_0/L_0 \sim H_0/d_{50}$ の関係で沿岸砂洲の発生限界を論ずることができる (ここに H_0 : 沖波波高, L_0 : 沖波波長, d_{50} : 50% 粒径)。しかしながら図-7, 8 に示したように侵食と堆積が必ずしも一致しない。そこでまず考えなければならないのはなぜ暴風海浜は Bar 型で侵食型といわれるのであろうか。これについて 図-10 に示すように Sand bar が発達成長する段階では汀線付近が侵食型となる。この結果から平常の波で Sand bar が比較的汀線に近い状態にある場合に台風等で大波が来襲し, Sand bar が沖へ移動する状態を考えれば汀線近くは Sand bar が安定するまで侵食型となることがわかる。こ

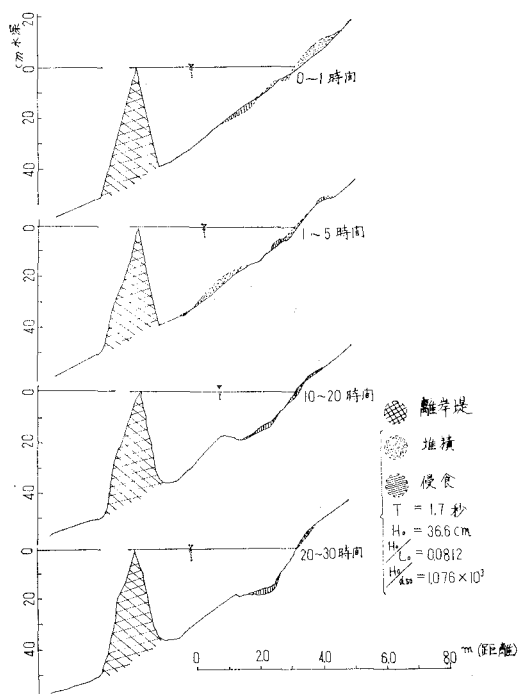


図-15 離岸堤による砂浜の時間的变化

のように考えればこれまでの考えと矛盾しない。

一方、細井・荒川⁸⁾は Sand bar を固定した場合の海岸変形を篠原・椿⁴⁾の掃流砂関数と粒径の関係で論じ、浮遊形式では侵食、掃流形式では堆積となることを明らかにした。この場合、掃流砂関数は拡散係数の1つの現われとみることができるが、現象の観察結果から見ると Bore 状の波はその前面が乱れのために砂粒子が浮遊状態にあり、後面では乱れが少なく沈降しながら動く。このため掃流砂関数の u_* (摩擦速度) の物理的意味に疑問が残る。このため著者らはこれらの問題は今後の研究課題としてまず沈降速度でこの現象を代表させた。

以上因子間の物理的意味については不明な点も多いが、比重が 1.30 の砂を含み、時間的な変化過程も含めた 図-13, 14 の結果はこれらの現象を説明しているものと考えられる。

(2) 離岸堤の設置位置

離岸堤による侵食防止の目的は

- (i) 離岸堤によりトンボロを発生させる。
- (ii) 砂の沖への移動を止める。

がある。(i) に対しては Sauvage・Vincent⁵⁾の実験的研究がある。また豊島⁶⁾の離岸堤の高さに対する調査研究がある。(ii) に対しては永井・久保⁷⁾、杉江・川口⁸⁾の実験的な研究がある。本実験結果は (ii) に対してその離岸堤の設置位置をあたえたことになる。

次に 図-14 と 17 を比較すれば $\frac{X}{V_0 T}$ が 0.5~1.0 では $\frac{h_1}{w_0 T}$ の限界値が離岸堤の場合に大きくなっている。これは離岸堤頂が静止水面に達しているのにくらべて Sand bar の頂上は低いことによるものと考えられる。一方 $\frac{X}{V_0 T}$ が大きくなると離岸堤で一度碎波した波が Bore 状から再び波にもどることが観察された。この影響は別途考えなければならないかもしれない。逆に $\frac{X}{V_0 T}$ が小さいところすなわち離岸堤が汀線近くでは離岸堤の周囲の洗掘によって沈下する。この問題は離岸堤の安定問題として考えなければならない。しかしながら $\frac{X}{V_0 T}$ が 0.2 付近で $\frac{h_1}{w_0 T}$ が小さい時に堆積型となる。これは底質粒径が比較的大きな現地海岸で汀線近くに離岸堤がある場合に観察されている離岸堤の効果がこの現象と類似する。

5. 結 論

本研究では二次元の場合の侵食対策について実験的に検討してきた。この結果次の点を明らかにした。

(1) 砂浜海岸の変形に対して波と底質粒径と底勾配の影響が考えられる。この作用因子を $\frac{X}{V_0 T} \sim \frac{h}{w_0 T}$ の無次元量によって整理した結果、図-13, 14 を得た。この図はこれまで考えられていたような初期勾配に対するものではなく、変動しているその時点の砂浜海岸の変形を論ずるものといえる。

(2) 侵食海岸に対して離岸堤による侵食防止対策を考える場合に 図-17 からその設置位置を設計することができる。この場合は汀線に直角方向の砂移動を対象としたものであるが、Sauvage・Vincent の実験結果も合わせて考えることにより有効な設計ができると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Johnson (1949): Scale effects in hydraulic model involving wave motion, Trans. A.G.U., Vol. 30, No. 4
- 2) Iwagaki, Y. and Noda, H. (1963): Laboratory Study of Scale effects in two dimensional beach processes, Proc. 8th Conf. on Coastal Eng.
- 3) 細井・荒川 (1968): 堤防前面の海浜変形に関する一考察, 第 15 回海岸工学講演会講演集
- 4) 椿 (1951): 水路床砂面の掃流量について, 九州大学力学研究所報告, 第 7 巻, 第 4 号
- 5) Sauvage, S. M. and Vincent, M. G. (1954): Transport littoral formation de fleches et de tombolos, Proc. 5th Conf. Coastal Eng.
- 6) 豊島 (1971): 離岸堤工法の設計指針, 第 18 回海岸工学講演会論文集
- 7) 永井・久保 (1970): 離岸堤に関する研究第 1 報, 第 17 回海岸工学講演会論文集
- 8) 杉江・川口・大島 (1972): 海底砂の安定に関する研究, 浅海域における増養殖漁場の開発に関する研究, 農業土木試験場
- 9) 中村・白石・佐々木 (1966): 碎波による波の変形に関する研究, 第 13 回海岸工学講演会講演集
- 10) 堀川・小森 (1968): 潜堤による風波の減衰機構について, 第 15 回海岸工学講演会講演集
- 11) Byrne, R. J. (1969): Field occurrences of induced multiple gravity wave, J. G. R. Vol. 74, No. 10
- 12) 中村・佐々木・大西・法貴 (1972): エアーカーテンによる消波機構について, 第 19 回海岸工学講演会論文集
- 13) 土木学会: 水理公式集 (昭和 46 年)