

海浜変形の予測に関する基礎的研究(第1報)

榎 木 亨*・出口 一郎**

1. ま え が き

従来海浜変形を予測するにあたっては長期間にわたって蓄積されたデータを基にその変動量の経年変化から変形の傾向を推定するか、あるいは水理模型実験によって推定する方法が行われており、最近では Pernard Considère の一次元モデルに基づいた汀線変化の数値的な予測方法も二、三試験的に行われるようになってきている。しかし最初に述べた方法では定量的な海浜変形予測は不可能であり、水理模型実験を行うにあたっては実験に使用する底質の縮尺を一意的に決定することができず、また波向およびその頻度の面からも大きな問題を有している。したがって移動床模型の相似性に対しては多大の時間と労力をかけているにもかかわらず定性的な傾向を推定するにとどまっている。一方、一次元モデルに基づいて汀線変化を予測するにあたっては基礎となる一次元モデル(汀線直角方向の漂砂量を無視する)の妥当性および沿岸漂砂量の汀線と直角方向の分布形状の地形変化に与える影響が考慮されていないといった基本的な問題点を含んでいる。

ここでは、まず基礎実験として実験水槽における漂砂移動の実態を明らかにした後、海浜変形の具体例として離岸堤背後に生ずるトンボロの形成過程をとり上げ、先の実験で得られた結果に基づき漂砂の連続方程式および漂砂量公式を用いて汀線に直角方向の漂砂量分布を考慮した数値計算を行って離岸堤背後に生ずる地形変化を予測した。そしてその計算結果と模型実験によって得られた結果との比較・検討を行って地形変動の数値予測法における問題点を明らかにしていく。

2. 漂砂移動に関する水理模型実験による検討

従来の沿岸漂砂量は碎波によって生ずる沿岸流の流速を河川における流砂量公式に適用して算定する方法、あるいは直接碎波点における波浪のエネルギーと結びつけた形で算定法が提唱されている。しかし最近になってよ

うやく Kommar ら¹⁾によって沿岸流速分布を考慮した漂砂量を求めようとする試みがなされているが、この研究とてもまだ物理的な漂砂機構に基づいた一般的な漂砂量を算定し得るには至っていない。さらに汀線に直角方向の漂砂に関しては二次元実験における底質の向岸方向への移動量と離岸方向への移動量の差としてとらえられた数例の研究結果が報告されている²⁾のみである。そこで著者らは、まず今回実験に使用する底質が汀線に平行な方向に一樣な強い沿岸流が存在する波浪条件において、どのような移動特性を示すかということを実験によって明らかにした。

(1) 実験装置及び実験方法

実験は幅 9.0m、長さ 12.6m の 1/40 に傾斜させた固定床に対し、水深 26cm の位置で平行な汀線に対して 30° の角度をなして波を入射させて行った。造波機は長さ 8.0m の造波板をもつ Frap-type である。実験に使用した底質は中央粒径 $d_{50}=0.41\text{mm}$ 、比重 $\sigma_s=2.64$ のかなり均一な粒度分布をもつ川砂と $88\mu\sim 297\mu$ 、および $297\mu\sim 500\mu$ の間にふるい分けられた $\sigma_s=1.56$ のコークスの 3 種類である。また波高の測定には容量式および抵抗線式波高計を用い、碎波角、沿岸流速の測定には水槽上 4m の高さに設置した 35mm モータードライブカメラでそれぞれ固定床上で行い、沿岸漂砂量の測定は上述の移動床の漂砂下流端に設置した幅 20cm の Sand trap で行った。なお三次元移動床実験におけるベクトル的な漂砂量 (q_x, q_y をそれぞれ汀線に平行および直角方向の成分とする) を明らかにする意味で底質を汀線に直角方向に着色砂で置換し、その移動方向を 35mm カメラで撮影した。実験ケースは表-1 に示す 8 ケースで、漂砂量および置換砂による底質の移動方向はすべてのケースにつき測定し、沿岸流については Run-1, 2 および 4 のみについて測定を行っている。

(2) 実験結果について

a) 碎波角および碎波波高について: Run-1~6 までのそれぞれの実験波に対する碎波波高 H_b 、碎波水深 h_b およびモータードライブカメラで撮影したフィルムから読み取った碎波角 α_b (碎波点での波向) を表-2 に示

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科

表-1 実験条件

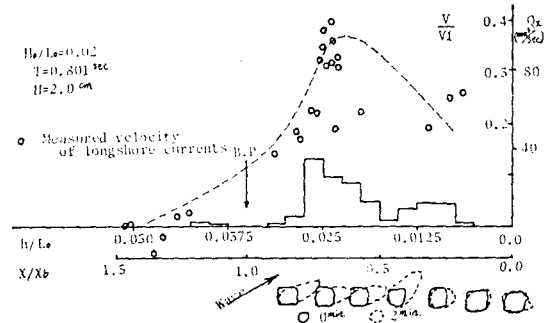
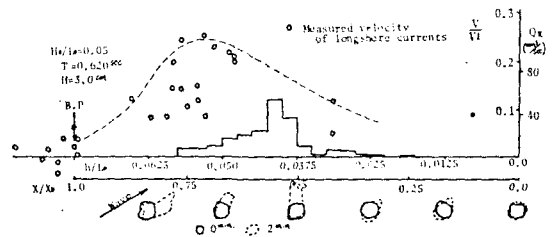
Run No.	H_0/L_0	H_0 cm	T sec	σ_s
1	0.02	1.0	0.566	1.56
2		2.0	0.801	1.56
3	0.05	3.0	0.980	2.64
4		2.0	0.506	1.56
5		3.0	0.620	2.64
6		4.0	0.716	2.64

表-2 碎波諸量

Run No.	1	2	3	4	5	6
α_b°	19.0	17.3	17.8	23.6	22.3	21.8
h_b cm	1.80	3.44	5.10	3.10	4.41	5.80
H_b cm	1.36	2.60	3.75	2.36	3.32	4.32

す。表-2 において $H_0/L_0=0.02$ および $H_0/L_0=0.05$ の周期が短い場合 (Run-1 および 4) 他の場合よりも無次元碎波水深 h_b/H_0 および無次元碎波波高 H_b/H_0 が大きくなっているのは Dicphus が指摘した Scale effect によるものであると考えられる。なお、碎波型の観測結果によると $H_0/L_0=0.02$ の場合は Spilling type, $H_0/L_0=0.05$ の場合は Plunging type の碎波型を示した。

b) 沿岸流速について: 沿岸流速の測定は径約 5 mm のウレタン製のトレーサーを汀線から汀線に直角方向に 50 cm 間隔に投入し、その変位をモータードライブカメラで撮影することによって測定した。ウレタン製トレーサーの比重はほぼ 1.0 で水中に完全に浮遊しており、したがってこの方法で測定された流速では沿岸流速の鉛直方向の流速分布を求めることはできない。以上の方法で測定された沿岸流速分布を Run-2, 4 についてそれぞれ図-1 および 図-2 に示す。これらの図の縦軸は実測された沿岸流速 V を Longuet-Higgins³⁾ によって導びかれた沿岸流速に対しては Smoothing term となる碎波帯内における mixing 項を省略した場合の碎波点における沿岸流速 V_1 で無次元化した値を、また横軸は汀線からの距離 X を碎波点の離岸距離 X_b で無次元化した値および沖波波長で表わした比水深 h/L_0 をとってある。なお、 V_1 を求めるにあたっては底部摩擦係数を 0.01 とし、表-2 に示す碎波点における諸量を用いている。図-1, 2 より明らかなように沿岸流速の分布は波形勾配にかかわらず碎波点より岸側、水深にして碎波水深の 0.7 倍付近で Peak をもち、碎波点より少し沖側で 0 になるような急激な減衰変化を示す。しかしこの減衰度は碎波形によってことなり、Spilling 型の碎波をする $H_0/L_0=0.02$ の方が Plunging 型の碎波をする $H_0/L_0=0.05$ よりも急激であり、また Peak における V/V_1 の値も大きくなっていることから Longuet-Higgins の考え


 図-1 漂砂量分布及び沿岸流速分布 ($H_0/L_0=0.05$)

 図-2 漂砂量分布及び沿岸流速分布 ($H_0/L_0=0.02$)

方に従うならば碎波帯内の mixing 項に含まれる渦動粘性係数は Plunging 型碎波の方が大きくあるべきと推定される。

c) 漂砂量分布および底質の移動方向について: それぞれの実験ケースについて Sand trap に捕砂された単位時間当りの漂砂量分布 Q_s (mm³/sec) を Run-2, 4 の $\sigma_s=2.64$ の川砂の場合について 図-1, 図-2 に示す。また汀線に直角に汀線から沖へ 20 cm 間隔で 3 cm × 3 cm の面積の底質を深さ約 1 cm まで同じ粒径、比重をもつ着色砂でおきかえ、その広がりを追跡した結果も図-1, 図-2 に示してある。漂砂量分布は Saville⁴⁾ および著者の一人⁵⁾ が指摘しているように波形勾配によって全く異なった分布形状を示し、 $H_0/L_0=0.05$ の場合は丁度碎波点と汀線の間で Peak をもち三角形分布を示し、 $H_0/L_0=0.02$ の場合は碎波点と汀線の間で台形分布を示す。しかし今回行った実験の実験波は Saville らが用いた実験波よりも小さく、週上高さも小さいために汀線より岸側で生ずるいわゆる浜漂砂は十分観測されなかった。この原因は今回行った実験の海底勾配が Saville らの実験 ($i=1/15$) と異なり 1/40 と緩勾配であることによるのではないかと考えている。また $H_0/L_0=0.02$ の場合漂砂量分布の沖側の Peak は沿岸流速が最大となる位置とはほぼ一致しているが、 $H_0/L_0=0.05$ の場合は漂砂量が最大となる地点は沿岸流速が最大となる地点よりも若干岸側に位置している。さらに底質の移動方向については底質の移動が水平方向に最大となる地点は波形勾配のいかにかわらず漂砂量分布が最大となる地点

よりもやや岸側に位置している。そして砕波点付近の底質の移動方向は波の進行方向とほぼ一致しており、35000波造波後においても砕波点付近の底質の移動方向はやはり波の進行方向とほぼ一致していた。先述のようにこの場合最大 4 cm/sec~5 cm/sec といった強度の沿岸流が生じているにもかかわらず沿岸漂砂のみが卓越しているのではなく、汀線に直角方向に移動する漂砂も相当量存在しており、したがって今回用いたような構造の Sand trap による沿岸漂砂量の測定においては完全に沿岸漂砂のみを分離して測定した結果ではなく、多分に Sand trap 近傍の波の進行方向と一致した漂砂をとらえているため沿岸漂砂量としては過大な評価を与えているものと思われる。

最後に波のエネルギーと直接結びつけられた漂砂量公式の代表例として Savage⁶⁾ によって提案された漂砂量公式と河川の流砂量公式に沿岸流速を用いて表わされた漂砂量公式の代表例として岩垣・榎木⁷⁾ の式より算定した漂砂量と今回の実験で得られた漂砂量の比較を 表-3 に示す。この結果によると、底質が砂およびコークスの場合の実測された漂砂量は榎木らの漂砂量公式によって算定された値のそれぞれ 0.75~1.35 倍および 0.3~1.0 倍、Savage の式より算定された値の 2.5~6 倍および 6~9 倍の値を示す。なお Savage の漂砂量公式は底質が砂の場合を対象としたものであり底質の比重、粒径の効果が含まれていないため底質にコークスを用いた場合の漂砂量と算定値とは大きな相異を示している。

3. 地形変化の数値予測法による検討

以上で考察したように漂砂量分布は決して単純には沿岸流速と結びつくものではなく、波動と流れが共存するような状態における底部摩擦の評価、浮遊砂の挙動、あるいは底質自体の拡散の問題といった点から解明していかなければならない問題ではあるが、以下において実験で得られた漂砂量分布形状を考慮して数値実験によって沿岸漂砂のみによって離岸堤背後に生ずる地形変化がどこまで予測しうるかという試みを行ってみたい。

表-3 漂 砂 量

Run No.	σ_s	Experiment Q_s	Calculation	
			Savage	Sawaragi
1	1.56	4.0×10^{-2}	6.6×10^{-3}	5.4×10^{-2}
2	1.56	2.4×10^{-1}	2.6×10^{-2}	2.4×10^{-1}
	2.64	6.3×10^{-2}	"	4.8×10^{-2}
3	2.64	2.0×10^{-1}	8.2×10^{-2}	1.7×10^{-1}
	1.56	1.3×10^{-1}	1.9×10^{-2}	4.2×10^{-1}
4	2.64	2.3×10^{-2}	"	8.3×10^{-2}
	2.64	1.8×10^{-1}	3.1×10^{-2}	2.1×10^{-1}
6	2.64	3.3×10^{-1}	1.2×10^{-1}	4.4×10^{-1}

(1) 基礎的な計算仮定

海岸に突堤等の構造物が建築された場合の海岸線の変化あるいは河口デルタの形成に伴う汀線変化といった問題については Pernard-Considére によって提案された一次元モデルに基づいた単純化されたモデルにおいて解析解が得られている⁸⁾。さらに橋本⁹⁾は離岸堤背後の地形変化に対しても一次元モデルが成立することを実験で検証した上で実験によって得られた漂砂量等のデータを用いて離岸堤背後に生ずる汀線変化の様子を数値計算で求め良好な結果を得ている。そこで著者らは一次元モデルでは考慮されない沿岸漂砂の汀線に直角方向の分布形状および水深が変化することによる入射波特性の変化、それにともなう漂砂量の変化を考慮して平行な等深線をもつ海岸に設置された離岸堤に波が直角に入射する場合、離岸堤背後に生ずる地形変化の予測を離岸堤による波浪変形をも含めた数値計算で行うことを試み、水理実験の結果と比較してみた。

前節において平行な等深線をもつ海岸に波が斜めに入射するといったごく単純な場合においても汀線に平行方向の漂砂と同時に無視し得ない量の汀線に直角方向の漂砂が存在することを明らかにしたが、定量的な評価ができるほど資料が得られず、汀線に平行方向の地形変動を問題にする場合汀線の直角方向の漂砂は移動量は大きくても向岸方向の移動量と離岸方向の移動量とがほぼ平衡すると考えると地形変化に与える影響は小さいと考えられるので今回の計算においてはこの量を考慮せず沿岸漂砂のみを考慮した地形変化の計算でどの程度現象を説明し得るかということを検討することにした。計算の対象とした離岸堤は一樣海底勾配 1/20 および 1/40 上の水深 6 cm の位置に設置された長さ 100 cm の不透過堤である。また数値計算を行うにあたっては以下のような仮定をもうけ、現象の単純化を行っている。すなわち底質の輸送は離岸堤による回折波のみによって生じ、離岸堤背後に生ずる離岸流による底質輸送は考慮しない。したがって底質輸送の連続方程式としては移動量を漂砂量公式として現わした従来の方程式が適用されるものとする。この場合の漂砂量は砕波点における波浪の諸条件(砕波角、砕波波高によって決定されるわけであるが、入射波が水深変化による Shoaling、離岸堤による回折といった変形過程を経て砕波に至る間の波浪変形計算は伊藤¹⁰⁾によって示された数値波動解析法によるものとする。

(2) 基礎方程式及び解析方法

波浪変形および地形変化の数値計算においては以下の基礎方程式に基づく。

波浪変形に対して:

$$\frac{\partial u_0}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v_0}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\left(\frac{1}{k}\right) \tanh\left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y}\right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u_0, v_0 : x, y 方向の表面流速、 η : 水位変動、 g : 重力加速度を示す。

地形変化に対して:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_w}{\partial x}\right) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 λ : 底質の空隙率、 q_w : x 方向 (汀線に平行方向) の漂砂量である。

以上の計算に用いる座標系を図-3に示す。

計算はまず式 (1)~(3) に基づいた数値波動解析によって離岸堤背後の砕波角および砕波波高の分布を求め、それらの値を用いて式 (4) と適当な漂砂量公式から水深変化を予測するという方法で行うわけであるが、その第一に問題となるのは砕波波高、砕波角の算定に用いる砕波条件である。この砕波条件としては種々のものが提案されているが、今回の場合は最も取り扱いやすい McCowan の孤立波理論に基づく式 (5) を用いた。

$$H_0/h_0 = 0.78 \dots\dots\dots (5)$$

ついで漂砂移動量を示す漂砂量公式としては表-3で示したように岩垣・根木の式は比較的実験値と一致するが一次元モデルによる計算結果と比較する意味において漂砂量公式における砕波角の項が $\sin 2\alpha_0$ という形で含まれている Savage 型の次に示す漂砂量公式を用いた。

$$Q_x = 1.95 \times 10^{-3} \cdot (E_0/2) \cdot \sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 \cdot k_b^2 \quad (\text{m}^3/\text{sec}) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 E_0 : 単位幅当たり沖波一波長のもつエネルギー、 k_b : 砕波点における屈折係数、 α_0 : 砕波角である。

地形変化の計算は離岸堤背後の領域を波浪変形の計算と同じ格子 ($\Delta x = L_0/25, \Delta y = L_0/25$) に分割し、式 (6) を差分化した以下に示す式を図-4 (a) に示すような簡単なスキームで行っている。

$$h(i, j)^{t+\Delta t} - h(i, j)^t = \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \{q_x(i, j)^t - q_x(i, j-1)^t\} \dots\dots\dots (7)$$

境界条件としての q_x の汀線に直角方向の分布は図-2 (b), 3 (b) に従って $H_0/L_0 = 0.02$ の場合は図-4 (b)

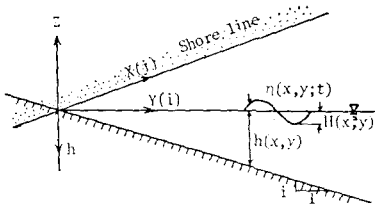


図-3 座 標 系

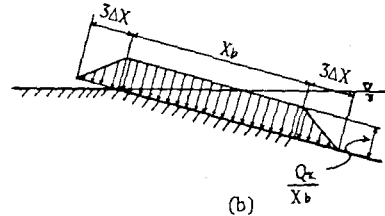
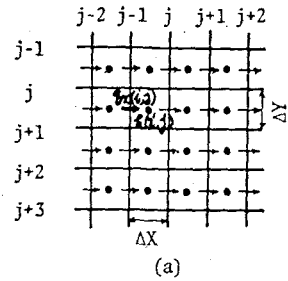


図-4 差分スキーム及び漂砂量分布

に示す台形分布、 $H_0/L_0 = 0.05$ の場合は汀線と砕波点の中央に頂点をもつ三角形分布として与え $\Delta t = 1.0 \text{ sec}$ として計算し、 $N = 600$ ステップの地形変化の計算終了後に地形変化に応じて汀線を前進、後退させた後その地形に対応した砕波波高、砕波角の計算を行って次のステップの地形変化の計算を行うという方法で検証実験と対応した 10 分、40 分、110 分後の地形変化の計算を行っている。

(3) 計算結果の実験的検証

(2) で求められる計算結果を検証するため固定床および移動床の実験を海底勾配 1/20 および 1/40 の場合について行った。この場合離岸堤は堤長 100 cm で水深 6 cm の位置に設置されており、作用させた波の特性は $H_0 = 2.0 \text{ cm}$ で $H_0/L_0 = 0.02$ および 0.05 の 2 種類の波で汀線に直角に作用させている。波高の測定は固定床で容量式および抵抗線式波高計で行い、砕波角の測定は水槽上 4 m の位置からモータードライブカメラによって写真測定を行っている。

また、移動床材料としては $\sigma_s = 1.56, d_{50} = 0.4 \text{ mm}$ のコックスを用い、地形変化の測定は静水深を 5 mm ずつ低下させその等深線を描くことによって行った。

a) 波浪変形に対する検証: 式 (1)~(3) に基づく波浪変形の計算についてはすでに十分な精度でその適用性が保証されているが、以下に行う地形変化の計算の大前提となる計算であるので一応今回行った固定床実験の結果と式 (1)~(3) に基づく計算結果の比較を海底勾配 1/20, $H_0/L_0 = 0.02$ の場合の離岸堤背後の $h/L_0 = 0.025, 0.0375, 0.050, 0.0563$ の水深に対して汀線に平行方向の波高分布を図-5に示す。計算においては水深 1 cm 以下の領域に対しては水深 1 cm の一様水深としているが図-5からも明らかなように計算値は実験値とよく一

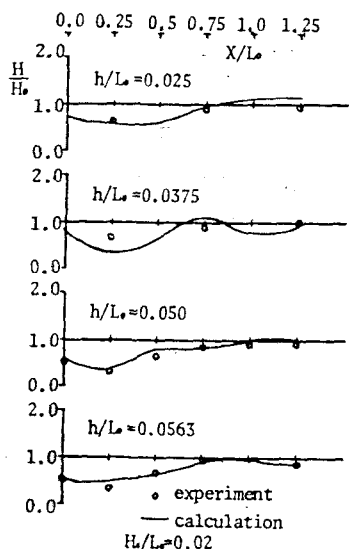


図-5 波高分布の比較

致している。次に碎波特性に対する検証を行った結果が図-6および図-7(b)である。図-6は碎波条件式(5)の検証結果で、実験において35mmモータードライブカメラで求められた碎波帯はある程度の幅をもっているが、計算によって求められた碎波点はほぼその中央にあり式(5)で碎波条件を与えて十分であると考えられる。

また図-7(b)は式(1)~(3)および式(5)の碎波条件を用いて計算した碎波波高の汀線方向の分布であって、これも計算値と実験値はほぼ一致している。

b) 地形変化に対する検証: a) によって得られた碎波特性を用い、式(4)および式(6)汀線の時間的変化

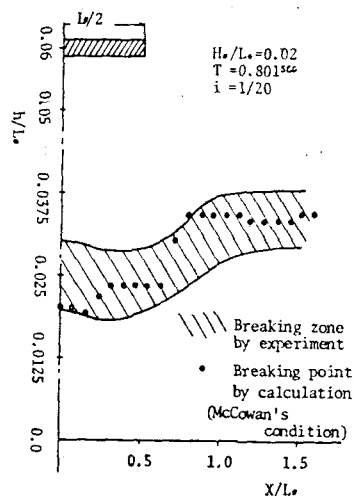
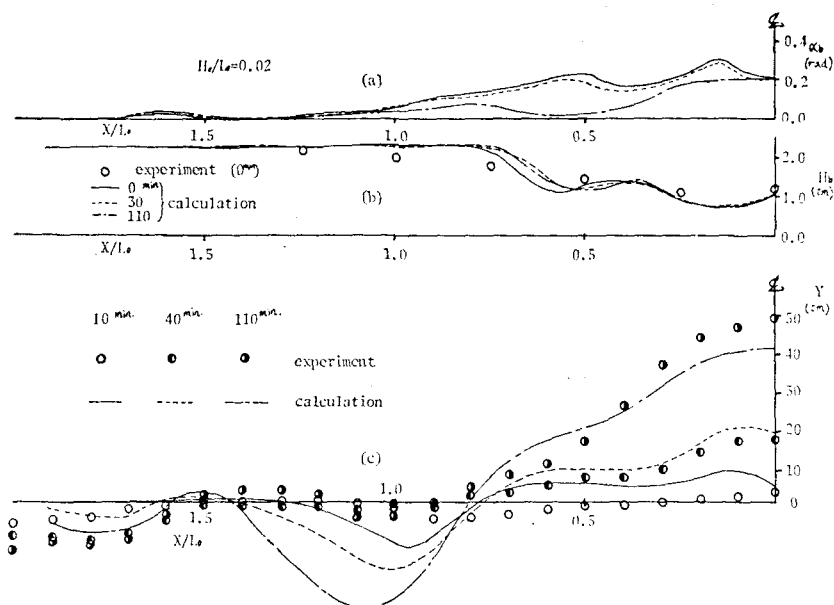


図-6 碎波点の比較

を求めた結果が図-7(c)であり、それぞれに対応した実験結果と比較して示してある。これによると離岸堤背後における汀線の前進形状は計算値と実験値とある程度のよい一致がみられるが、離岸堤中央から $x/L₀ = 0.8 \sim 1.4$ においては計算では汀線に対し直角方向の漂砂を無視しているため回折波の影響を過大評価することにより実験では生じていない大きな汀線の後退がみられる。また図-7(b)より明らかなように100分までの地形変化に対応する碎波波高の変化はほとんどみられず、一方図-7(a)に示す碎波角は離岸堤中央から $x/L₀ = 0.4$ の範囲では徐々に、 $x/L₀ = 0.4 \sim 0.9$ では急速に減少しており、この付近の地形変化はほとんど平衡状態に達しているものと考えられるが計算時間の関係上全体的な地形

図-7 碎波角・碎波波高分布及び汀線変化 ($H₀/L₀ = 0.02$)

変化の最終形状までは計算するにはいたっていない。しかし図-7(c)からも明らかなようにある程度の定量的な地形変化の予測は今回用いた線型化された理論で求められた碎波波高, 碎波角等の水理量を用い漂砂の連続方程式において汀線に直角方向の漂砂移動を全く無視するといった単純な数値計算においても可能であることが判明した。

4. む す び

以上, 漂砂の特性を水理実験によって確かめ, その特性を用いて数値波動解析と漂砂の連続方程式に基づいて離岸堤背後に生ずる地形変化の数値シミュレーションを試みた。しかしより精度の高い予測を行うためには波浪条件に対応した漂砂の移動機構に基づくさらに正確な漂砂量(方向も含む)の評価が必要となることはいうまでもない。なお本研究は自然災害特別研究の結果の一部であることを報告するとともに, 実験および数値計算に協力していただいた元大学院生北村雅敏君, および現大学院生樽野次雄君に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Komar, P.D.: The mechanics of sand transport on beaches, Jour. Geophy. Res., Vol. 76, No. 3, pp. 713~721, 1971.
- 2) 樫木 亨: 海岸侵食に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 89号 pp. 1~10, 1963.
- 3) Longuet-Higgins, H.S.: Recent Progress in the Study of Longshore Currents, Wave on Beaches, Edited by Meyer, R.E., Academic Press, pp. 203~248, 1972.
- 4) Saville, T.Jr.: Model study of sand transport along an infinitely long, straight beach, Trans, A.G.U., Vol. 31, No.4, pp. 555~565, 1950.
- 5) 樫木 亨: 海岸侵食に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1960.
- 6) Savage, R.P.: Laboratory determination of littoral-transport ratio, Proc. A.S.C.E., No. WW. 2, pp. 69~92, 1962.
- 7) 岩垣雄一・樫木 亨: 沿岸漂砂の新算定法について, 第7回海講講演集, pp. 59~68, 1960.
- 8) Bakker, W.T., Klein, E.H.J., and Roos, A: The dynamics of a coast with a groyne system, Proc. of 12th Conf. on Coastal Engg. pp. 1001~1020, 1970.
- 9) 橋本 宏: 離岸堤による隣接海岸への影響モデル, 第21回海講論文集, pp. 181~185, 1974.
- 10) 伊藤喜行・谷本勝利: 数値波動解析とその応用—構造物周辺の波—, 第18回海講論文集, pp.67~71, 1971.

- 1) Komar, P.D.: The mechanics of sand transport