

# 海岸浸食に関する基礎的研究

榎 木 亨\*

**要 旨** 従来、海岸浸食に関してはなんら体系的な研究が行なわれていず、特に浸食の機構については未知の問題としてとり残されている。著者らは長年この問題にとりくんで海岸浸食に関係する諸現象について研究し発表してきたが、本論文においては、これらの研究成果をとりまとめ、最初に汀線と直角方向の漂砂による海岸浸食の機構を、第2に汀線と平行方向の漂砂による海岸浸食の機構を論じて、浸食の基礎的な考え方を説明し、最後にその応用的研究として海浜変形におよぼす海岸構造物の影響および移動床の模型実験によって砂の移動状況を明らかにする場合の相似性について述べたもので、海岸浸食に関し一貫した考え方で研究を進めた結果を報告したものである。

## 1. 緒 言

波の作用をうける海岸線は絶え間なく、前進、後退をくり返しているが、人口が増大し海岸に近接した地点に生活を営む人が多くなり、さらに海岸の利用化が進むにしたがって、海岸浸食に対する防御、海岸線の安定に関する問題が、われわれの社会生活に対して重大な関連性をもつようになってきた。しかし、この海岸浸食機構の問題は、複雑さのために、研究の進展はおそく、合理的な浸食制御の対策をたてることが困難な現状である。こうしたことから、この海岸浸食機構の解明は以前から要望されていた重要課題であった。著者も従来より多年にわたりこの問題にとりくみ、海岸浸食に関する各種の課題を研究し、研究結果をそのつど発表してきたが、本論文において、これらの研究を総合して、海岸浸食機構の究明に際しての著者の考え方をとりまとめて報告したい。

海岸浸食は海岸漂砂の移動の結果生じるものであるから、著者は海岸浸食を漂砂の移動性状により分類して、短期間の海浜形状の変化と長期間の沿岸過程の変化とにわけて考えることとし、さらに二、三の沿岸構造物が海岸浸食にいかに関与するかを究明していくとともに、海岸変形を推定する有力な手段である移動床の模型実験の相似性についても検討を加えることとする。したがって本論文は、

- ① 汀線と直角方向の漂砂による海岸浸食
- ② 汀線と平行方向の漂砂による海岸浸食
- ③ 海浜変形におよぼす海岸構造物の影響
- ④ 移動床の模型実験に関する相似性

の4つに大別され、論議が進められている。

## 2. 汀線と直角方向の漂砂による海岸浸食

このような漂砂の移動の立場から、その浸食機構を論じる場合、河床の変動に対する考え方と同様に、海底物質の運動機構を論ずるものと、砂礫の移動量を論ずるものとの2つの立場がある。前者は波の淘汰作用の解明に重要な役割をなしており、海岸の安定勾配の考え方に指針を与えるものと思われる。

一方、砂礫の移動量による立場は打上げ波および引き波による砂の移動量分布の差から、海浜変形の過程を推定しようとするものであって、両者の移動量が一致すれば、海浜断面はその波に対して安定であるといえる。著者らは後者の立場に立って、海岸の安定勾配（これを平衡勾配という）、さらに、それを用いて浸食機構を論じていくものであるが、これらの砂礫の移動量を論じるためには、漂砂の運動機構を解明しなければならないことはいうまでもない。

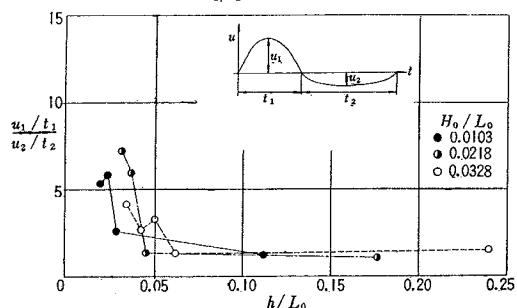
したがって、本章においては、まず漂砂の運動機構、漂砂量分布から海岸の平衡勾配を説明し、この平衡勾配の概念を用いて、汀線と直角方向の海岸浸食機構を明らかにしようとするものである。

### (1) 漂砂の運動機構

まず、著者は漂砂の運動機構を力学的に解析するには、運動する砂礫の上にある流体の運動の実態を明らかにすべきことに着目し、差圧式流速計を用いて各領域における水粒子速度の変動状況および砕波後における波の質量輸送を明らかにしたが、その詳細については先に海岸工学講演会講演集で発表した<sup>1),2)</sup>。

図-1は著者の実験結果による流速の時間的変化の非対称性を示すもので、 $u_1/t_1$ は岸向き流れの、 $u_2/t_2$ はもどり流れの平均的な加速度を表わすものである。この図から、砕波後の岸向きの流れはもどり流れに比しきわめ

図-1  $\frac{u_1/t_1}{u_2/t_2}$  と  $h/L_0$  の関係



\* 正員 京大工博 徳島大学助教授工学部土木工学科

て大きな加速度をもち、砕波後の砂の移動に大きな影響をおよぼすことがわかる。

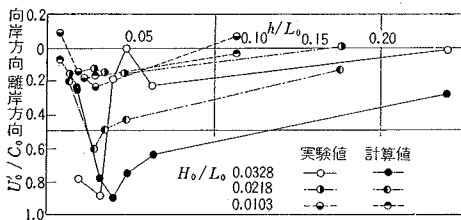
つぎに砂の移動量に重要な影響をおよぼす水の質量輸送速度を見ると、砕波後の質量輸送速度  $\bar{U}'(z)$  は、もどり流れの影響を考慮して、次式で示されることが実験結果から確かめられた。

$$\frac{\bar{U}'(z)}{C_0} = \frac{\pi(H)}{4(L)} \left\{ 2\pi \frac{(H)}{L} \frac{\cosh kz}{\sinh^2 kh} - \frac{H}{h} \coth kh \right\} \times \frac{C}{C_0} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $C_0$  は沖波の波速、 $z$  は鉛直方向の底部からの距離、 $H$  は水深  $h$  における波高、 $C, L$  はそれぞれ  $h$  における波速、波長、 $k=2\pi/L$  を示す。

また、底部のもどり流れを考慮した質量輸送速度  $\bar{u}_0$  は、式(1)で  $z=0$  とおいて示されるが、その計算結果と実験結果を比較したのが図-2であり、その傾向については、 $H_0/L_0$  による変化は認められない。つぎに著者はこのような流速変化を示す流体による砂の運動機構のうち、浅海波の領域内での砂の初期移動に関して、流れの非定常性、加速度による影響を考慮して、実験、理論の両面より綿密な検討を加え、加速度による物体の抵抗係数の変化にともなって、河川の場合の移動限界と異

図-2 底部の質量輸送速度の位置変化



なることを明らかにした。さらに、波の運動下における抵抗法則、砂の移動限界流速、Du Boys の流砂量公式および Vincent の砂の移動量に関する実験結果<sup>9)</sup> を用いて、波の周期を考慮した単位時間、単位幅あたりの往復の平均移動量  $q_s$  をつぎのように導いた。

$$q_s = C_s(\omega^2 \cdot A^2/T) [\pi - 2\omega t_c + \sin(2\omega t_c)] \dots (2)$$

ここに、 $C_s$  は底質の特性によって表わされる値であり  $\omega = 2\pi/T$ ,  $A = H/2 \sinh(2\pi h/L)$ ,

で、 $T$  は周期、 $\omega t_c$  は移動限界時の phase を示す。

この詳細は先に海岸工学講演会講演集<sup>4)</sup> に発表したの、それを参照されたい。

(2) 海岸の平衡勾配

さて、このような運動機構をもつ砂の移動により海浜は漸次変形して沖波の波形勾配に応じた平衡勾配を形づくっていくが、先の砂の移動量および限界流速の論議は浅海波理論の成立する領域でなり立つものであって、その力学的機構の不明な砕波領域にまでこの公式を適用することには疑問がある。そこで、一般に、この平衡勾配は実験によって求められなければならないが、この海浜の平衡勾配は入射波の特性<sup>9)</sup>、初期海浜勾配<sup>9)</sup>、底質の

比重<sup>7)</sup> によって影響をうけ、さらに、また波高に比して底質粒径の比がきわめて大きな効果を与えることがすでに認められている。著者は底質粒径を異にした3種類の砂について、それぞれの波形勾配に応じた平衡勾配を求めた。その結果については防災研究所論文集<sup>9)</sup> に詳細に論じておいたので、それを参照されたい。

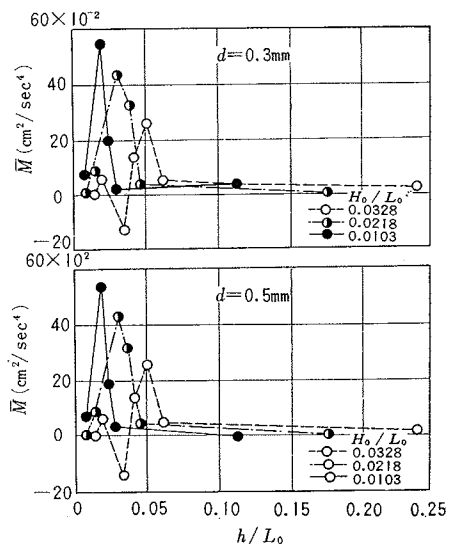
これによると、 $d/H_0 = 8.0 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-2}$  程度の底質では、沖波の波形勾配  $H_0/L_0$  が 0.02~0.03 付近を境にして、この値より大きい波形勾配では砂洲が発生し、それより小さい波形勾配の波では砂洲が発生しないという結果を得た。しかし  $d/H_0$  の小さい大型水槽の実験においては、必ずしも  $H_0/L_0 = 0.025$  以上で砂洲を作るのではなく、 $H_0/L_0 = 0.025$  以下の波でも砂洲を作り、浸食性の海岸を示す事実が Saville<sup>9)</sup> によってみだされている。この海浜変形の相違については次項の海浜変形の機構において論ずることとしたい。

(3) 海岸変形の機構

以上、変形の原因となる砂の移動性状、および砂の移動の結果として最終的に形成される平衡勾配について論議してきたが、実際の海浜は時々刻々変化する入射波の特性に対応して変化していく。ここでは実験で得られた平衡勾配の海岸地形を用いて、このような場合の海浜の変形過程を推定する方法をとることとするが、それに先立って 2.(1) で述べた海岸断面形(固定床、一樣勾配)に沿う流速分布と、著者が先に明らかにした砂の限界流速ならびに移動量公式とが砕波後においても適用できるものとして、海岸断面に沿う漂砂量分布から平衡勾配の実験結果に検討を加え、砂洲の成因、浸食海岸の形成原因を究明しておこう。

2.(1) で述べた実験波の流速分布の実験値を用い、さらに 0.3 mm, 0.5 mm の底部限界流速の値をとって海

図-3 海岸断面に沿う漂砂量の変化図



岸断面に沿う砂の移動量の分布図を求めると 図-3 のような結果をえる。すなわち、図-3 においては、横軸に  $h/L_0$ 、縦軸には式 (2) を求める基礎となった Du Boys の公式

$$\Delta q_s = C_s' u^{*2} (u^{*2} - u_c^{*2})$$

に、抵抗法則

$$\left(\frac{u_b}{u^*}\right)^2 = \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \cdot A \frac{\sin^2(\omega t)}{\sin(\omega t + \pi/4)}, \text{ および}$$

$$\left(\frac{u_{bc}}{u_c^*}\right)^2 = \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \cdot A \frac{\sin^2(\omega t_c)}{\sin(\omega t_c + \pi/4)} \dots\dots\dots (3)$$

を代入して得られる。

$$\Delta q_s = C_s' \frac{u_b^2}{\omega \nu \cdot A} \left\{ \frac{\sin(\omega t + \pi/4)}{\sin^2(\omega t)} \right\}$$

$$\times \left\{ u_b^2 \frac{\sin(\omega t + \pi/4)}{\sin^2(\omega t)} - u_{bc}^2 \frac{\sin(\omega t_c + \pi/4)}{\sin^2(\omega t_c)} \right\}$$

\dots\dots\dots (4)

の右辺の  $C_s'$  を除いた部分の一周期の平均値を  $\bar{M}$  で表わして示してある。ここに  $\Delta q_s$  は単位時間、単位幅の砂の移動量で  $C_s'$  は底質の特性によって定まる定数、 $u^*$  は摩擦流速、 $u_b$  は浅海波理論における底部流速で  $u_b = \omega A \sin \omega t$  で表わされ、 $u_{bc}$  は砂の移動限界時の  $u_b$  を示す。また  $u_c^*$  は限界摩擦流速を表わす。式 (4) において一定の周期の波および一定粒径の砂に対して  $\omega t_c$  は一定値をとるが、 $\omega t$  の値によって式 (4) の値が負の値になる場合があり、その値が大きいと一周期の平均値  $\bar{M}$  もまた負となることがある。ここでは岸に向かう流速を正と考えているから、 $\bar{M}$  の正は砂が一周期を通じて考えれば岸に向かって運ばれることを意味し、負の場合は砂が沖の方に運ばれることを表わしている。したがって、この図において正の傾斜部分は堆積を、負の傾斜部分は浸食される領域を意味し、さらに正の傾斜部分が O 軸と交わる点で砂洲ができるものと考えられる。

こうした事実を考慮して浸食、堆積の傾向を検討すると、この程度の波 ( $H_0 = 4.62 \sim 6.81$  cm) による流速分布から推定した結果では、底質粒径  $d$  が 0.3 および 0.5 mm 程度では波形勾配が 0.0328 の場合には砂礫の粒径の大小にかかわらず、砂洲が発生し、その位置はほぼ  $h/L_0$  が 0.03~0.04 の範囲であろうと推定される。

この推定結果が先の平衡勾配に関する実測結果とよく一致していることから、この漂砂量公式を砕波後に適用しても定性的には間違いのない結果を示すことがわかる。したがって、砕波後の流速の変化が完全に解明されれば、その変形機構もおのずからわかるようになるものといえよう。

つぎにさきに述べた海浜変形におよぼす砂の粒径の効果を、この方法によって検討してみよう。海浜の変形のはげしいところは、もちろん砕波点近傍から岸側の地点であり、その地点の流速変化が理論的に解析されていないので明確にすることはできないが、入射波のエネルギー

が大きく、 $u_b$  の値が  $u_{bc}$  に比較して非常に大きい場合、あるいは粒径が非常に細かくて、 $u_{bc}$  の値が小さい場合には、移動量は式 (5) で近似的に表わすことができる。

$$q_s = C_s'' \cdot \omega^{-1} \cdot A^{-2} \cdot u_b |u_b|^3 \frac{\sin^2(\omega t + \pi/4)}{\sin^4(\omega t)},$$

$$C_s'' = C_s' / \nu \dots\dots\dots (5)$$

ここに、— は一周期の平均を示す。

この式から移動量は 2.(1) で詳述した質量輸送速度の変化と同じ傾向をもつようになり、したがって、この場合は 図-2 からわかるように波形勾配による海浜変形の差異はあまりなくなり、ほぼ  $h/L_0 = 0 \sim 0.04$  の場所は浸食され、0.04 付近から漸次堆積することになって、この浸食、堆積の変わる地点で砂洲が発生するものと推定される。このような場合が Saville<sup>9)</sup> によって認められた大型水槽実験での砂洲の発生であろう。このように海岸変形に対して波形勾配の影響は底質粒径  $d$  と波高  $H_0$  の比  $d/H_0$  に無関係ではなく、 $d/H_0$  によってその影響範囲が左右されることがわかる。

いままでは一様勾配から平衡勾配への変形について論じたものであるが、つぎにある平衡勾配をもつ海岸地形から、入射波の変化にともなってほかの平衡勾配の海岸に変化していく過程について考えてみる。

この場合、問題になるのは、初期勾配を異にする海岸地形の変化に、著者らの求めた平衡勾配の実験結果が、入射波の特性や底質と入射波との相対的關係が一致したとしても、そのまま適用できるかどうかということであり、また変形するのにどの点を基準にして変化していくかということである。

これらの疑問のうち初期勾配の影響については、九州大学の研究<sup>9)</sup> によれば初期勾配による差異はあまり表われないという結果が得られている。また、基点としては漂砂の移動限界水深があげられる。この移動限界水深については、従来の研究論文で著者らがたびたび発表しているように2種類のものと考えられる。すなわち、それより沖側では漂砂がなんら生じないと考えられる水深<sup>9)</sup>  $h_i$  と掃流漂砂がほとんど生じない水深<sup>10)</sup>  $h_c$  とである。

それぞれについては、すでに発表しているもので、ここではその説明は省略するが、地形変化が比較的短時間に行なわれることから、 $h_c$  を基点として選ぶ方が妥当と考えられる。この  $h_c$  を用い、さらに新しい  $d/H_0$  に対する平衡勾配の海岸地形を基点から逆に追跡していけば、新しい入射波に対応した海岸地形が求められるわけである。この方法の具体的な例については第8回海岸工学講演会講演集<sup>11)</sup> に説明した。

なお、以上の海岸の平衡勾配はすべて実験によって求められたもので、移動床実験をふくむ scale effect として、 $d/H_0$  によって実験結果を整理しているが、この無

次元表示で果たして実際の海岸に実験結果が適用できるかどうかという疑問が生じる。このことは、その変化の基点となるべき移動限界水深を選ぶ場合においても問題となろう。このような相似率の問題については、5. でくわしく論議することとしたい。

以上、汀線と直角方向の海浜断面の変形について、砂の運動から論議し、理論的な考察が可能な浅海波領域については理論および実験の両面から、また理論的な取り扱いができない砕波領域では実験結果を主として検討を加えたが、つぎに長期の海浜変形を左右する沿岸方向の漂砂にもとづく浸食機構について論じていこう。

3. 汀線と平行方向の漂砂による海岸浸食

この場合も 2. と同様に、漂砂から海岸浸食を論議するにあたって2つの立場があるが、砕波によって生じる沿岸流そのものの流れの機構が明らかでないため、本論文においては、砂の運動機構については省略し、沿岸砂の移動量の立場から浸食を論じていくことにする。

著者は沿岸漂砂量を求めるにききだって、沿岸漂砂量と沿岸流速の関係を基礎実験の結果にもとづいて明らかにした。その結果、単位幅あたりの単位時間漂砂量  $q$  は沿岸流速  $u$  と式(6)で示すような関係をもつことが明らかにされた。

$$q = 3.4 \times 10^{-3} [u(u^2 - u_c^2)]^{0.8} \dots\dots\dots (6)$$

このような基礎的な関係、平均沿岸流速と波のエネルギーの関係を用いて、漂砂と波の特性との新しい関係を導いた。この沿岸漂砂量の推定方法としては Florida および California での実測にもとづいて沿岸漂砂量  $Q_i$  と波のエネルギーの沿岸方向の成分  $E_i$  との関係を表わした実験公式があるが<sup>12), 13)</sup>、これには粒径の効果がまったく考慮されていない。この点がこの方法の致命的な欠点ともいえるようで、Beach Erosion, Board<sup>14)</sup> においても実験結果からこの点を指摘している。著者も以前に、この  $Q_i$  と  $E_i$  との関係を示す波形勾配の効果を考慮した実験曲線<sup>15)</sup>を求めたが、同じ海岸においても波高の大きい入射波に対してこの曲線が適用できるかどうか疑問であったし、実測結果と一致しない場合がおこったので、つぎに述べるように別の新しい沿岸漂砂量の推定式を求めた。すなわち、式(6)で示したように沿岸漂砂量と沿岸流速との関係が河川の流砂量公式と同じように表わされるという事実にもとづいて、入射波の特性の異なった実験や現地海岸における実測結果を用い、

$$\frac{Q_i}{\psi} = 31.7 \times \left( \frac{E_i \cdot i^{2/3}}{\varphi} \right)^{3/2} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $Q_i$  は単位時間の全沿岸漂砂量であって、 $E_i$ ,  $\psi$  および  $\varphi$  はそれぞれ次式で示す値である。

$$E_i = (1/16) \cdot \rho \cdot g \cdot (L_b \cdot H_b^2 / T) \sin 2 \alpha_b$$

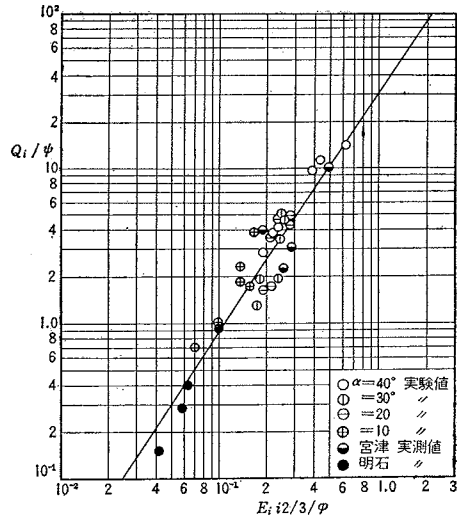
$$\psi = g^{1/2} \cdot (H_0' / L_0)^{1/6} \cdot H_0'^{13/2} \cdot i^{1/3} \cdot d \cdot (\sin 2 \alpha_b)^{1/3} \cdot \cos \alpha_b$$

$$\varphi = (\sigma - \rho) \cdot g^{3/2} \cdot d \cdot H_0'^{11/2} \cdot L_b \cdot (H_0' / L_0)^{1/6} \cdot (\sin 2 \alpha_b)^{1/3}$$

という推算公式を導いた。ここで添字  $b$  は砕波点の諸量を示し、 $\sigma, \rho$  は砂、水の密度、 $g$  は重力の加速度、 $\alpha$  は波の入射角、 $H_0'$  は相当沖波波高を示す。また図-4は式(7)の関係を表わしたものである。なお、この公式を導く過程については第7回海岸工学講演会講演集<sup>16)</sup>を参照されたい。

式(7)については、明石海岸の塩屋地点において、海岸構造物の近傍に堆積した漂砂量の実測値と、堆積期間中の風の資料から追算した波による計算値とを比較することにより、その妥当性を検証したが、両者はよく一致

図-4 無次元漂砂量  $Q_i/\psi$  と  $E_i i^{2/3}/\varphi$  との関係



した。この式(7)を用いて、従来から論議されてきた沿岸漂砂量におよぼす沖波の入射角<sup>17)</sup>や波形勾配の影響<sup>18)</sup>などを明確にすることができた。これについても第7回海岸工学講演会講演集に詳述してあるので省略する。

また、著者はこの式(7)および年間の風速風向の記録を用い著者らが長年調査してきた、明石海岸、泉南海岸の各地点における漂砂量を推定し、隣接地点の漂砂量の差からその区間の浸食量、堆積量を推定したが、その結果、従来砕波高分布などから推定した浸食領域や堆積領域とは必ずしも一致しないことがわかった。このことから、海浜過程はやはり漂砂量の沿岸分布を推定して判定しなければならぬということがいえる。

以上、沿岸漂砂による海浜変形を沿岸漂砂量に主眼点をおいて論じてきた。しかし、海岸構造物が建設されると、この海浜過程の傾向が異なってくる。以下、先に述べた漂砂に関する研究成果にもとづいて構造物の影響を論じていくことにする。

4. 海浜変形におよぼす海岸構造物の影響

この海岸構造物の海浜変形におよぼす影響は、漂砂の

移動を生ぜしめる波浪の変形や減殺の効果であり、この研究によって海岸構造物の浸食制御の機能を十分に把握することができるであろう。海岸浸食と制御の方法には直接的に漂砂や波を阻止する方法と、間接的に波を減殺して入射波の特性を変形せしめ、その結果、砂を堆積せしめる方法とがある。前者には防砂堤、護岸などの海岸構造物があり、後者には離岸堤、潜堤などが考えられる。本論文では主として入射波の特性の変化にとりまわす漂砂移動の変化や波の変形を取り扱い、直接的に漂砂に捕捉する防砂堤や背後地を防御する護岸の機能については割愛して置く。ただし、護岸や海岸堤防の維持の面から堤防前面の洗掘と沿岸漂砂量におよぼす堤防の影響については問題として取り上げた。

(1) 離岸堤

ここでは離岸堤の漂砂遮断の機構、およびそれとともに形成していくトムボロ地形について論じることにする。

離岸堤は沖から海底地形によって屈折し入射してくる波をさらに回折させ、その水域内の波高、入射角および砕波水深に変化を与え、砕波によって起こされる岸沿いの流れの流速を減殺せしめて、離岸堤の遮蔽領域に砂を堆積させようとする。その結果、遮蔽領域において汀線が逐次前進し、舌状の海岸線を形成する。この地形をトムボロと称しているが、このトムボロの形成発達に関する実験結果はすでに先年発表<sup>19),20)</sup>したので、ここでくり返して述べないが、トムボロの最終形状は離岸堤の長さ  $B$  と波長の比  $B/L_0$  および  $H_0/L_0$  によって規定されることがわかった。

また式(7)で示す沿岸漂砂量公式によって、その堆砂効果を調べるため、離岸堤前面における入射波の屈折係数  $K$  および砕波点における回折係数  $K_b'$  を導入して、回折後の沿岸漂砂量を表わす式を求めれば、つぎのようになる。すなわち、式(7)中の  $\psi, \varphi, E_i$  の値を式(7)に代入し  $H_0' = H_0$  と考えると、

$$Q_i = 31.7 \times \left(\frac{1}{16}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)^{-3/2} \cdot g^{-1/4} \cdot H_0^{15/4} \cdot T^{-3/2} \cdot i^{4/3} \cdot d^{-1/2} \cdot (\sin 2\alpha_b)^{4/3} \cdot \cos \alpha_b \cdot (H_0'/L_0)^{-1/12}$$

となり、 $\frac{1}{T} = \sqrt{\frac{g}{2\pi}} \sqrt{\frac{1}{L_0}}$  および  $H_0' = KK_b'H_0$  を用いると

$$Q_i = k_1 H_0^3 \cdot i^{4/3} d^{-1/2} (H_0/L_0)^{2/3} (\sin \alpha_b)^{4/3} \cdot (\cos \alpha_b)^{7/3} (K, K_b)^{11/3} \dots \dots \dots (8)$$

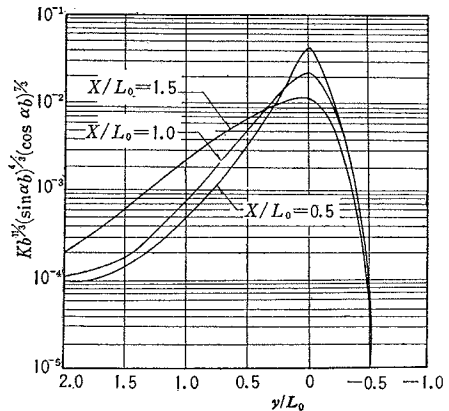
ここに  $k_1 = 31.7 \times (1/16)^{3/2} \cdot (\sigma/\rho - 1)^{-3/2} \cdot g^{-1/4} \cdot (g/2\pi)^{3/4} \cdot (2)^{4/3}$ 、 $i$  は海浜勾配を表わす。

式(8)において、沖波の波高  $H_0$  および波長  $L_0$ 、海浜勾配  $i$ 、底質の粒径  $d$  を一定とし、離岸堤の前面まで波が屈折しないでやってくる場合を考えれば、式(8)は式(9)となる。

$$Q_i \alpha (K_b')^{11/3} \cdot (\sin \alpha_b)^{4/3} \cdot (\cos \alpha_b)^{7/3} \dots \dots \dots (9)$$

図-5は離岸堤の先端を基準(0)にとり海岸に沿って離岸堤内部に向かって正とった距離  $y$  との関係を示したもので、 $y$  は汀線から離岸堤までの距離  $x$  とともに波長  $L_0$  で割って無次元化してある。これより  $x/L_0$  の値が小さいほど離岸堤の先端の位置における漂砂量と離岸堤による遮蔽水域内の漂砂量との差は大きく、 $x/L_0$  が大きくなるにしたがってその差は少なくなっていくことがわかる。海浜の浸食や堆積は海岸に沿う漂砂移動量の差によって生じるから、その差が小さいほど海浜変形は少ないといえる。

図-5 堆砂効果におよぼす離岸堤の位置の影響

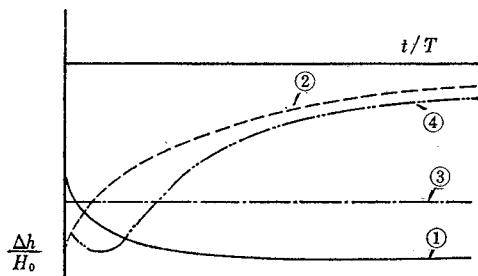


これらの結果を宮津湾の防波堤に適用して具体的に論じたが<sup>20)</sup>、ここでは省略することにする。

(2) 海岸堤防の堤脚部における洗掘について

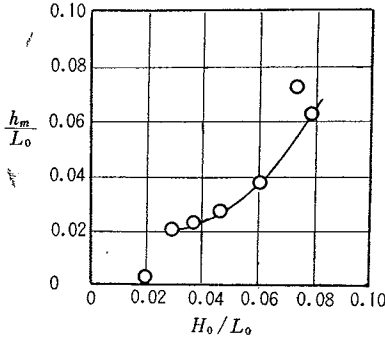
海岸堤防の存在は、その前面の浜の浸食を助長せしめる役割を果たしている場合が少なくない。著者は実験により、その機構について考察を進め、京大防災研究所年報<sup>21)</sup>に報告したが、その洗掘深さ  $\Delta h$  の時間的変化は堤防の位置によって4つの型に分類することができることがわかった。すなわち 図-6 に示すように、堤防前面の水深  $h_0$  と沖波波高  $H_0$  の比  $h_0/H_0$  が、 $0.025 < h_0/H_0 < 0.35$  のとき①、 $0.35 < h_0/H_0 < 0.55$  のとき②、 $0.55 < h_0/H_0 < 0.77$  のとき③、 $0.77 < h_0/H_0$  の場合には④、のような時間的変化をする。ここに  $t$  は波の作用継続時間、 $T$  は波の周期を示す。

図-6 洗掘過程の分類



また、最終洗掘深さ  $d h_F$  は堤防前面の初期水深が増加するともなって増大していくが、ある水深を越えると逆に洗掘深さは減少するようになる。この最大の洗掘がおこる堤防の位置は、最大の洗掘がおこるときの堤防の設置水深  $h_m$  と波形勾配との関係を示す 図-7 でわかるように、波形勾配が大きくなるにしたがって沖の方に移動していくが、砕波水深  $h_b$  との関係を見ると、 $H_0/L_0$  に関係なく、ほぼ  $(h_b - h_m)/L_0$  の値が一定値をとることがわかった。

図-7 最大洗掘がおこる堤防の位置と波形勾配との関係



なお、沿岸漂砂量におよぼす海岸堤防の影響についても実験結果から考察を進めたが、それによると、有堤時の漂砂量分布は無堤時のそれにくらべて、漂砂量が堤防前面に集中し、漂砂強度をいちじるしく強めるが、沖側の部分では無堤時とはあまり変化がないことがわかった。そして堤防の影響範囲はほぼ沖波波長の 1/2 より小さい領域であることが見出された。

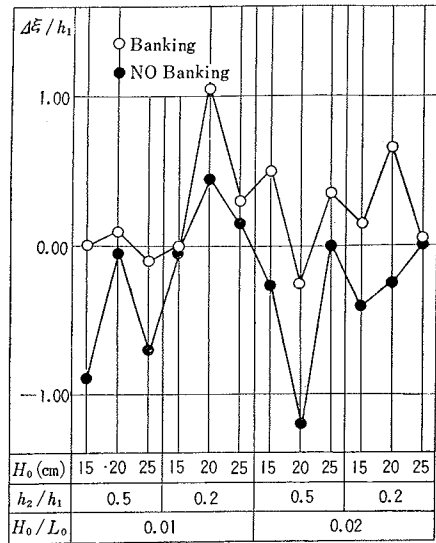
このような堤防前面の漂砂強度の増加は、前面の浜の浸食を助長する重要な要因の一つであり、構造物建設にあたっては特に注意を要する事からであろう。

(3) 潜堤および養浜について

海岸浸食の防御工法としては従来用いられてきた防砂堤、離岸堤、護岸堤防のほか、近年離岸堤の一種である潜堤工法がしばしば用いられるようになってきた。さらにこの潜堤と併用して積極的な浸食対策としての養浜工法がとられてきている。この潜堤と養浜の併用理由は、潜堤自体による波力減殺効果はあまり顕著でないの、むしろ海浜の砂の沖方向への流出を防止する機能をもたせようとする事によるものである。この潜堤と養浜工の併用による波力減殺効果については、京大防災研究所年報<sup>23)</sup>に報告したが、ここでは海岸浸食に関係のある汀線の前進、後退におよぼす潜堤および養浜の効果について述べておこう。

図-8 は汀線の移動量を  $d\xi$  とし、潜堤を設置する前の汀線の位置を基準にとり、前進量を正、後退量を負として、潜堤の潜水度  $h_2/h_1$  ( $h_2$ : 潜堤の天端の深さ,  $h_1$ : 潜堤の前面水深) と波形勾配  $H_0/L_0$  の影響を示したもので、潜堤のみの場合 (黒丸) と潜堤の岸側に養浜した

図-8 潜堤および養浜工による汀線の変化



場合 (潜堤の高さに水平に養浜) (白丸) とが区別して図示してある。これによると  $H_0/L_0=0.01$  で  $h_2/h_1=0.2$  の場合を除き潜堤を設置するのみでは、沿岸方向に漂砂のないこのような場合には、汀線は後退することがわかる。これは平行堤設置による海岸浸食防御法において興味のある問題であって、いたずらに波力の減殺を目的とした構造物を築造しても、海岸浸食の防御工法とはならない場合があることを示唆するものであろう。しかしながら、図でわかるようにこの汀線の後退も養浜工を併用することによって逆に前進させることができる。この養浜による汀線の前進は底質粒径と沖波波高の比  $d/H_0$  に非常に大きな影響をうけ、 $d/H_0$  の増加にしたがって急激に前進することがわかったが、これについてはさらに詳細な研究が必要であろう。

5. 移動床模型実験の相似性について

以上述べたように、海浜変形の過程を明らかにするために、海岸断面に沿う質量輸送速度の変化や漂砂量の分布を推定して判定する方法のほかに、一般に模型実験によってその砂の移動状況を明らかにする方法がとられる場合が多い。これら模型実験による場合、その実験の相似性がきわめて重要となることはいうまでもない。

汀線と直角方向の砂の移動に関しては、式 (2) で示される砂の移動量公式と浅海波理論を用いて、砂の移動をとまらう現象の力学的な機構を考慮した相似率について考察し、第8回海岸工学講演会講演集<sup>11)</sup>に詳述したが、それによると、式 (10) あるいは式 (11) という結果が得られた。

- (i)  $u_c^* \cdot d/\nu < 10$  の場合
 
$$\{(S_1-1)^3/(S_2-1)^3\} \cdot d_1/d_2 = z_1/z_2 \dots\dots\dots(10)$$
- (ii)  $10 < u_c^* \cdot d/\nu < 60$  の場合

$$\{(S_1-1)/(S_2-1)\} \cdot d_1/d_2 = (\alpha_1/\alpha_2)^{1/4} \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 $u_c^*$  は限界摩擦速度、 $\nu$  は水の動粘性係数、 $S$  は砂の比重、 $d$  は粒径、 $\alpha$  は鉛直方向の距離を示し、添字 1 および 2 はそれぞれ模型および実物に対する量を表わす。これによれば、模型においても実物と同じ比重をもつ砂を用いるものとすれば、 $u_c^* \cdot d/\nu$  は  $T$  および  $h$  の関数であるから、 $T$  および  $h$  により、粒径の比は鉛直縮尺比に等しくするか、あるいは鉛直縮尺比の 1/4 乗に比例させるかの両者の場合があることがわかる。ただこれは浅海波領域にのみ適用できるもので、砕波領域については、このような関係はまだ不明で今後の研究課題といえよう。

つぎに汀線と平行方向の沿岸漂砂に対する相似則について考察する。式 (7) で示す沿岸漂砂量公式は式 (12) のように書きかえることができる。

$$Q_i = m(\sigma/\rho - 1)^{-3/2} \cdot g^{-1/4} \cdot H_0^{11/4} \cdot T^{-3/2} \cdot i^{1/3} \cdot d^{-1/2} \cdot (H_0'/L_0)^{-1/12} \cdot (\sin 2\alpha_b)^{1/3} \cdot \cos \alpha_b \quad (12)$$

ここに、 $m = 31.7 \times (1/16)^{3/2}$

さらに連続式として式 (13) が与えられる。

$$\partial x/\partial t + \{1/(1-\lambda)\} \partial Q_i/\partial x = 0 \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 $\alpha$  は鉛直方向の距離、 $\lambda$  は空けき率を示す。

式 (12) から  $Q_i$  は  $H_0'/L_0$  および海浜勾配  $i$  に影響されることがわかり、模型をひずますと、 $H_0'/L_0$  および  $i$  も変わるから模型をひずますことができないことが明らかとなる。模型をひずまさない場合は式 (12)、(13) より沿岸漂砂に対する相似則として

$$(\alpha_1/\alpha_2)^3 = \{(S_1-1)/(S_2-1)\}^3 \cdot d_1/d_2 \quad \dots\dots(14)$$

が容易に求められる。

模型は一般に汀線と直角方向および平行方向の両者の漂砂移動を対象とする場合が多いが、この両者の漂砂の移動機構を相似せしめるような模型縮尺は、汀線と直角方向の砂の移動が式 (10) で表わされる範囲では、式 (10) と式 (14) より、

$$(\alpha_1/\alpha_2)^2 = 1 \dots\dots\dots(15)$$

という関係を満足しなければならない。このことは現地と同じ大きさの模型でなければ完全に相似さすことができないということを示している。

また汀線と直角方向の砂の移動が式 (10) で示される範囲では、式 (10) と式 (13) よりその縮尺比は式 (16) で表わされる。

$$(\alpha_1/\alpha_2)^{11} = \{(S_1-1)/(S_2-1)\}^8 \dots\dots\dots(16)$$

このことから式 (15)、(16) で示すいずれの場合でも、小さい模型において両者の砂の移動性状を現地に完全に相似させることはきわめて困難であり、模型実験によって砂の移動状態を定量的にみいだすことは容易でないことがわかる。

以上の事実をさらに具体的な数値例を与えて明らかにしておこう。いま現地の底質の特性が  $d_2 = 0.22 \text{ mm}$ 、 $\alpha_2$

$= 2.66$  の場合、1/100 の模型縮尺で実験を行なう場合、模型の底質はどの程度にしなければならないかを検討してみる。模型において  $\alpha_1 = 1.20$  という動きやすいケースを用いると、沿岸漂砂に対しては、式 (14) より

$$d_1 = (1.66/0.20)^3 \times (1/100)^3 \times 0.22 = 1.26 \times 10^{-4} \text{ mm} \dots\dots\dots(17)$$

という底質粒径が得られる。

一方、汀線と直角方向の砂の移動に対しては、

$u_c^* \cdot d/\nu < 10$  の場合

$$d_1 = (1.66/0.20)^3 \times (1/100) \times 0.22 = 1.26 \text{ mm} \dots\dots\dots(18)$$

$10 < u_c^* \cdot d/\nu < 60$  の場合

$$d_1 = (1.66/0.20) \times (1/100)^{1/4} \times 0.22 = 0.58 \text{ mm} \dots\dots\dots(19)$$

という値が得られる。

式 (17)~(19) で示す値を見れば、模型においては沿岸漂砂は汀線と直角方向の漂砂に比してきわめて移動しにくくなり、汀線と直角方向の漂砂に比較して沿岸漂砂に対する実験は、その相似性をもたせることが非常に困難となることがわかるであろう。

## 6. 結 語

以上、著者は従来からとりくんできた波による砂の移動について、すでに発表してきた研究成果もふくめて、この問題に対する総合的な考え方を述べてきた。これらの研究は現象の複雑さのために、理論的な考察が可能な浅海波領域については理論、実験の両面から、また理論的解析の不可能な砕波領域をふくむ場合は、主として実験にもとづいて研究を進めた。これら砕波現象をふくむ場合は理論的には十分に解明されていないが、これまでこの種の一貫した体系的な研究がほとんどなく、不明のままに放置されてきたといつてよいこの分野に対してこの研究が寄与するところは大きいものと信じている。なお、紙面の都合上、研究報告がその結果のみに終わったが、詳細はその箇所の発表論文を参照していただければ幸いである。最後に多年にわたって終始御指導をいただいた京都大学 石原藤次郎教授、岩垣雄一教授に深甚の謝意を表するとともに実験に協力していただいた方々に感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎・榎木 亨・天野哲男：漂砂の運動機構に関する基礎的研究 (第 1 報)、土木学会第 5 回海岸工学講演会講演集 昭 33.11, pp. 65-71.
- 2) Ishihara, T., Sawaragi, T. and Amano, T.: Fundamental Studies on Dynamics of sand Drift (Report 1 and 2), Coastal Eng. in Japan, Nov. 1959, pp. 35~52.
- 3) Vincent, G.E.: Contribution to the Study of Sediment Transport on a Horizontal Bed due to Wave Action, Coastal Eng. No. 6, 1958, pp. 326~354.
- 4) 石原藤次郎・榎木 亨：漂砂の移動限界流速、限界水深お

- よび移動量について(漂砂の運動機構に関する基礎的研究第3報), 土木学会第7回海岸工学講演会講演集, 昭35.11, pp. 47~58.
- 5) Johnson, J.W.: Scale Effect in Hydraulic Model Involving Wave Motion, Trans., Amer. Geophys. Union, Vol. 30, No. 4, Aug. 1949, pp. 517~527.
  - 6) 栗原道徳・篠原謹爾・椿 東一郎・吉岡益男: 波による海浜の砂移動, 土木学会 第3回海岸工学講演会講演集, 昭31.11, pp. 151~158.
  - 7) 篠原謹爾・椿 東一郎・斎藤 隆: 漂砂と波の特性に関する研究, 土木学会第5回海岸工学講演会講演集, 昭33.11, pp. 61~64.
  - 8) 岩垣雄一・榎木 亨: 海岸の平衡勾配に関する二, 三の問題について, 京都大学防災研究所創立5周年記念論文集, 1956, pp. 233~240.
  - 9) Saville, T. Jr.: Scale Effects in Two Dimensional Beach Studies, Proc. 7th General Meeting, I.A.H.R. 1957.
  - 10) 岩垣雄一・榎木 亨: 海浜の平衡勾配と碎波による砂移動に関する実験, 土木学会第2回海岸工学講演会講演集, 昭30.11, pp. 99~105.
  - 11) 榎木 亨: 移動床実験の現地海岸への適用に関する一考察, 土木学会第8回海岸工学講演会講演集, 昭36.9, pp. 134~138.
  - 12) Watts, G.M.: A Study of Sand Movement at South Lake Worth Inlet, Florida, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 49, 1953, pp. 1~36.
  - 13) Caldwell, J.M.: Wave Action and Sand Movement near Anaheim Bay, California, Beach Erosion Board, No. 68, 1956, pp. 1~21.
  - 14) Savage, R.P.: Laboratory Study of the Effect of Groins on the Rate of Littoral Transport; Equipment Development and Initial Tests, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 114, June 1959, pp. 1~56.
  - 15) 榎木 亨・村上 仁: 沿岸漂砂量の推定について, 土木学会第4回海岸工学講演会講演集, 昭32.11, pp. 41~50.
  - 16) 岩垣雄一・榎木 亨: 沿岸漂砂量の新算定法について, 土木学会第7回海岸工学講演会講演集, 昭35.11, pp. 59~68.
  - 17) Saville, T. Jr.: Model Study of Sand Transport Along an Infinitely Long Straight Beaches, Trans., Amer. Geophys. Union, 1950, pp. 555~565.
  - 18) Johnson, J.W.: Sand Transport by Littoral Currents, Proc. 5th Hyd. Conf. Bull. 34, States University Iowa, Studies in Eng., 1953, pp. 89~109.
  - 19) 榎木 亨: 沿岸漂砂に及ぼす構造物の影響, 土木学会第4回海岸工学講演会講演集, 昭32.11, pp. 51~58.
  - 20) Adachi, S., Sawaragi, T. and Ogo, A.: On the Effect of Coastal Structure to the Littoral Sand Drifts, Trans., Coastal Eng. in Japan, Vol. 2, pp. 85~98.
  - 21) 榎木 亨・川崎芳一: 海岸堤防堤脚部の洗掘について, 京都大学防災研究所年報, 第4号, 昭37.3, pp. 198~209
  - 22) 石原藤次郎・岩垣雄一・榎木 亨: 養浜の波高減衰効果に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報第5号, (創立10周年記念号) 昭37.3, pp. 296~305.

(原稿受付: 1962.5.24)



# FUNDAMENTAL STUDIES ON BEACH EROSION

By Toru Sawaragi C.E. Member

So far, the systematic studies on beach process have been scarcely developed, and the establishment of the mechanics of beach process have been left as unknown field because of the complication of its mechanism.

The author has made an effort to clarify this subject for many years, and published some of the results of studies in the Proceedings of the Conferences on Coastal Engineering in Japan and the Annuals of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

In this paper, the summary and conclusions of the studies on this subject by the author are presented with the following items:

1. Fundamental studies on the dynamic process of beach erosion by the sand movement in the perpendicular direction to a shoreline.
2. Fundamental studies on the dynamic process of beach erosion by littoral sand drifts.
3. Applied studies on the dynamic process of beach erosion by coastal structures.
4. Similitude on model experiments on moving bed.

## 1. Introduction

The studies on the mechanism of beach process have been scarcely developed for the difficulties of experiments and observations. This phenomena is caused by sand movement, and is divided into (1) the change of beach profiles for a short period by sand movement in the perpendicular direction to a shoreline and (2) the beach process for a long period by littoral sand drifts. Therefore, in this paper, the basic research of beach erosion has been made through the analyses for the two kinds of behaviors of sand movement. Furthermore, the influence of coastal structures on beach process is analyzed, that is quite significant to prevent beaches from local erosion. And using the basic research on sand movements by waves, the similitude on model experiments on moving bed has been revealed.

## 2. The study of dynamic process of beach erosion by sand movements in the perpendicular direction to a shoreline.

Before the investigation of the change in beach profiles as the combined actions of waves and beach materials is attempted, the basic problems such as the dynamics of sand movement due to wave action and the equilibrium slope of beaches must be solved.

Therefore, at first, the dynamics of sand movement is revealed theoretically and experimentally, and the equilibrium slope of beaches is explained based on the mechanics of sand movement. Furthermore, the dynamic process of beaches is discussed by using the idea of equilibrium profile.

### 2-1. The dynamics of sand movement.

First, the motion of water particle near the sea bottom is measured by the current meter of unbonded gauge type in order to obtain the fundamental knowledge on the behavior of sand movement.

The time rate of the velocity change of water particle becomes asymmetric in its shape when wave progresses to the shoreline, and it is cleared that the mean acceleration in the on-shore direction is very larger than that in the offshore direction in surf zone. And assuming that constant and uniform back current is produced in the whole depth, the mass transport velocity of water particles  $\bar{U}(z)$  in surf zone is expressed as follows.

$$\frac{U(z)}{C_0} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{H}{L}\right) \left\{ 2\pi \left(\frac{H}{L}\right) \frac{\cosh kz}{\sinh^2(kh)} - \frac{H}{h} \cot kh \right\} \cdot \frac{C}{C_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

in which,  $H$ : wave height,  $L$ : wave length at water depth  $h$ ,  $C_0$ : wave velocity in deep water,  $C$ : wave velocity at water depth  $h$ , and  $k = 2\pi/L$ .

Next, the effect of flow acceleration on the incipient motion of sand grains due to water waves is analyzed on the basis of the experimental results of critical velocity for sand

movement in unsteady flow. And using the relationships of the incipient velocity for sand movement, a formula for the rate of sand drift is proposed.

**2-2. The equilibrium slope of beaches.**

In this article, the effects of sand size and characteristics of incident waves on the equilibrium slope of beaches are made clear by the experimental research. It is observed in this experiment for the case of  $8.0 \times 10^{-3} < d/H_0 < 4 \times 10^{-2}$ , that longshore bars are formed at some distance from the shoreline under the action of waves of greater steepness than not developed for waves of less steepness.

**2-3. The mechanism of beach profile variation.**

Referring to the study on the critical velocity and the formula for the rate of sand drift stated in 2-1., and to the experimental result of water particle velocity distribution along the sea bottom, the average amount of sand drift at various locations along the beach profile can be estimated for  $d=0.3$  mm and  $d=0.5$  mm. Therefore the discrimination between deposition and erosion regions in beach profile variation becomes possible from the change in estimated amount of sand drift along the beach profile. Furthermore, the process of change from a equilibrium slope to another equilibrium slope due to the change in incident wave characteristics can be estimated from the experimental result of equilibrium slope and the critical depth for sand movement.

**3. The study of dynamic process of beach erosion by littoral sand drifts.**

Littoral sand drifts are caused by longshore current, and so the relationship between the behavior of sand drift and longshore current must be established. From this reason, an empirical formula for the rate of littoral sand drift is proposed as following equation.

$$\frac{Q_i}{\psi} = 31.7 \left( \frac{E_i d^{2/3}}{\varphi} \right)^{3/2} \dots\dots\dots (2)$$

in which,  $Q_i$  : rate of littoral sand drift,  $E_i$  : wave energy component of longshore direction =  $(1/16) \rho g (L_b \cdot H_b^2 / T) \sin 2 \alpha_b$ ,

$$\psi = g^{1/2} (H_0' / L_0)^{1/6} H_0'^{3/2} \cdot i^{1/3} d (\sin 2 \alpha_b)^{1/3} \cos \alpha_b$$

$$\varphi = (\sigma - \rho) \cdot g^{3/2} \cdot d \cdot H_0'^{1/2} L_b (H_0' / L_0)^{1/6} (\sin 2 \alpha_b)^{1/3}$$

$\alpha_b$  : incident angle of breaker,  $H_0'$  : equivalent wave height in deep water,  $\sigma$  : density of sand,  $\rho$  : specific gravity of water and suffix  $b$  indicates the values at breaking of waves.

Based on this formula, the effects of incident angle of deep water wave, wave period and height, wave steepness and size of sand grains on the rate of littoral sand drift are discussed.

**4. The effects of coastal structures on beach processes.**

In this chapter, the shoreline deformation and scouring depth of sea bottom resulting from constructions of coastal structures, such as offshore breakwaters, sea walls, submerged breakwaters and nourishment of beaches are discussed by the experiments. And the development and final stable forms of tombolos resulting from the construction of an offshore breakwater, the maximum scouring depth at the foot of a sea wall and the effect of a submerged breakwater on the damping of waves height are disclosed experimentally in terms of the influences of shapes of structures, water depth at which the structure will be constructed and wave steepness.

**5. Similitude on the model experiments of moving bed.**

Using formulas of the rate of sand drift in 2-1 and 3, similarities for sand movement in the perpendicular direction to a shoreline and littoral sand drifts are analyzed. From this result, it is revealed in the model experiments on moving bed that two kinds of behavior of sand movement do not satisfy the similitude simultaneously, except when the model scale is equivalent to the prototype.

[Received (by the Society) May 24, 1962]