

過渡状態下にある海浜変形過程の実験計画法による 実験的研究 (1)

増 田 重 臣*・伊 藤 政 博**

1. 緒 言

海浜変形過程に関しては、大別すると、実験的研究・現地観測および観測資料による研究・統計的研究・理論的研究などによる方法で研究が進められている。これらの研究により、これまでにいくつかの興味ある事実が明らかにされているが、まだ不明な点も少なくない。なぜなら、現地の砂質海浜では、そこへ外力として作用している波・風・沿岸流などが変化するので、それに対応して、海浜は絶えず変動している。このような過渡状態下にある海浜は Macro scale 的には外力に対応した平衡状態に近づいていくが、Meso scale 的には常に非定常状態にあるといえる。

海浜変形過程を実験的に研究しようとする場合、その多くは造波水槽内にある初期浜勾配 (Flat な傾斜面) を有する模型海浜を造り、一定の波形勾配の波を長時間作用させる方法で、海浜が順次平衡状態に到達する過程について研究が行われてきた。しかし、現地海浜では、一定の波形勾配の波が長期間作用することではなく、その強さは常に変動しているので、海浜変形現象もより複雑なものになっている。

そのため、実験的に過渡状態を再現させる実験方法による研究が必要になってくる。これまでに、過渡状態下にある海浜変形過程の動的挙動については、入江¹⁾らによる時定数を導入した研究や、Nayak²⁾による任意の海浜断面からの変形過程についての研究があるのみで、いまだその挙動が十分に究明されていないようである。

そこで、著者らは海浜変形過程の問題を取扱うにあたり、Flat な初期浜勾配を有する海浜に長時間波を作用させたときの海浜変形過程と、ある海浜形状 (Normal beach, Transition type beach, Storm beach) を有する海浜に同じように波を作用させたときの海浜変形過程について、これら 2 つの場合にどのような海浜変形過程をたどるかについて追求する必要があると考えた。

この報告は、実験的に比較的短時間内に起こる海浜変形過程について調べ、この結果を解析しその一部を明らかにしたものである。

2. 海浜変形過程の次元解析と実験因子の抽出

Flat な初期浜勾配を有する海浜に波が作用すると、海浜はその波に対応した平衡形状 ① に順次変形して行く (図-1)。次に、平衡形状 ① にこれまでとは異なった波形勾配の波が作用すると、再度、新たな平衡形状 ② に順次変形して行く。

そこで、初期浜勾配から海浜形状 ① に到達するまでの過程と、海浜形状 ① から ② に到達するまでの過程について、無次元式による表示を考える^{3), 4)}。図-1 のように、海浜形状 ① と静水面とが交わる点を原点とし、海浜変形過程を支配している物理量を考えると、

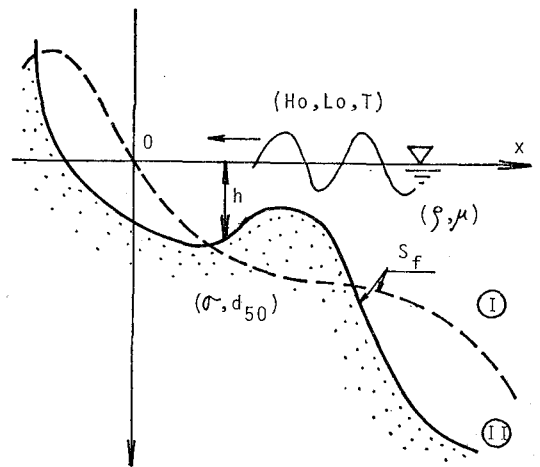


図-1 記号の説明

- x : 汀線から沖方向の距離,
- h : 静水面から海浜面までの深さ,
- d_{50} : 底質砂の中央粒径,
- σ : 底質砂の密度,
- ρ : 流体の密度,
- μ : 流体の動粘性係数,
- H_0 : 沖波波高,
- L_0 : 沖波波長,
- T : 波の周期,
- t : 波の作用時間,
- g : 重力の加速度,
- S_f : 初期海浜形状 (Normal beach, Transition type

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 名城大学助手 理工学部土木工学科

beach, Storm beach)あるいは初期浜勾配。

以上の物理量の中から、適当な基本量を選んで、次元解析を行い、若干の変形をすると、鉛直方向の無次元海浜変形量 h/L_0 は、

$$\frac{h}{L_0} = f_1 \left(\frac{x}{L_0}, \frac{d_{50}}{H_0}, \frac{H_0}{L_0}, \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right), \frac{\nu}{d_{50} \sqrt{g H_0}}, \frac{t}{T}, S_f \right) \dots \dots \dots (1)$$

式(1)で、実験的に、過渡状態下にある海浜変形過程を取り扱うとき、底質砂は密度 σ の均一な砂を使用するので、底質砂の水中比重 $\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right)$ の効果は無視し、さらに、水の粘性効果をも無視すると、 $\frac{\nu}{d_{50} \sqrt{g H_0}}$ を除外することができる。なお、このほかに造波水槽水平部での水深の効果は無視している。結局、式(1)は式(2)のようになる。

$$\frac{h}{L_0} = f_2 \left(\frac{x}{L_0}, \frac{d_{50}}{H_0}, S_f, \frac{H_0}{L_0}, \frac{t}{T} \right) \dots \dots \dots (2)$$

したがって、位置 x/L_0 における海浜変形量 h/L_0 を支配する外的作用因子は d_{50}/H_0 , S_f , H_0/L_0 , t/T であると考えられる。これらの4個の無次元因子から、実験条件を決定するための実験因子として、 d_{50} , S_f , H_0/L_0 , t を選び出して、実験計画法⁹⁾を適用する。実験因子は $L_8(2^7)$ 型直交配列表に割り付ける⁹⁾。

Flat な初期浜勾配を有する海浜に8時間波を作用させた場合の海浜変形過程：I、この後、Iとは異なる沖波波形勾配の波を作用させた場合の海浜変形過程：II、と

して、実験因子は次の i)~iv) の水準値を持たせる。

i) d_{50} : 図-2 の粒径分布を持ったメサライト砂を使用。

$$\left. \begin{matrix} (d_{50})_1^I \\ (d_{50})_1^{II} \end{matrix} \right\} : 0.33 \text{ mm}, \quad \left. \begin{matrix} (d_{50})_2^I \\ (d_{50})_2^{II} \end{matrix} \right\} : 2.60 \text{ mm}$$

ii) S_f : I の場合、初期海浜形状は Flat な初期浜勾配を有する海浜。

$$(S_f)_1^I : 1/10, \quad (S_f)_2^I : 1/18.$$

II の場合、I で波が8時間作用した後の海浜形状を初期海浜形状とする。

iii) H_0/L_0 : 2種の沖波波形勾配を持つ規則波を使用(表-1)。

$$\left. \begin{matrix} (H_0/L_0)_1^I \\ (H_0/L_0)_1^{II} \end{matrix} \right\} : 0.0119, \quad \left. \begin{matrix} (H_0/L_0)_2^I \\ (H_0/L_0)_2^{II} \end{matrix} \right\} : 0.0308$$

iv) t : 海浜変形状態が平衡状態に到達するための所要波の作用時間は約140~280時間⁷⁾程度とされているが、この実験では過渡状態下での海浜変形過程の動的挙動を調べることを目的としているので、8時間にした。波の作用開始後次の時間になったとき、海浜変形量を測定した。

$$\left. \begin{matrix} (t)_1^I \\ (t)_1^{II} \end{matrix} \right\} : 0.25 \text{ hr.}, \quad \left. \begin{matrix} (t)_2^I \\ (t)_2^{II} \end{matrix} \right\} : 0.5 \text{ hr.},$$

$$\left. \begin{matrix} (t)_3^I \\ (t)_3^{II} \end{matrix} \right\} : 1.0 \text{ hr.}, \quad \left. \begin{matrix} (t)_4^I \\ (t)_4^{II} \end{matrix} \right\} : 2.0 \text{ hrs.},$$

$$\left. \begin{matrix} (t)_5^I \\ (t)_5^{II} \end{matrix} \right\} : 4.0 \text{ hrs.}, \quad \left. \begin{matrix} (t)_6^I \\ (t)_6^{II} \end{matrix} \right\} : 6.0 \text{ hrs.},$$

$$\left. \begin{matrix} (t)_7^I \\ (t)_7^{II} \end{matrix} \right\} : 8.0 \text{ hrs.}$$

i)~iv) の水準値をもつ実験因子は、(a) 無作為化の原理、(b) 小わけの原理、(c) 繰返しの原理、(d) 交絡の原理、(e) 直交化の原理を適宜使用して、 $L_8(2^7)$ 型直交配列表に割り付ける⁹⁾(表-2)。実験の繰返し数は解析の精度を上げるため、(c) の原理を考慮に入れて3回とした。図-3は、実験因子の組み合わせを決定する表-2から、 H_0/L_0 と $\frac{H_0}{d_{50}(s/s_0-1)}$ を計算し、これらの間の関係と、実験条件 I から II への変化状態を示したものである⁹⁾。この図から、実験因子は Normal beach, Transition type beach, Storm beach の3領域に位置していることがわかる。

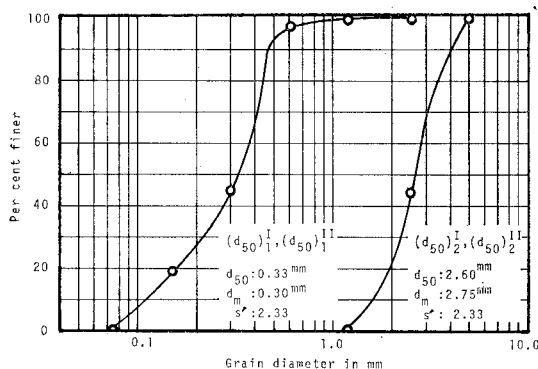


図-2 実験砂(メサライト砂)の粒径分布、
(s^* =メサライト砂の乾燥比重)

表-1 実験波の特性

Experimental factor H_0/L_0	Period T (sec.)	Deep-water wave height H_0 (cm)	Deep-water wave length L_0 (m)	Deep-water wave steepness H_0/L_0
Level 1; $(H_0/L_0)_1^I, (H_0/L_0)_1^{II}$	2.30	9.8	8.25	0.0119
Level 2; $(H_0/L_0)_2^I, (H_0/L_0)_2^{II}$	1.58	12.1	3.91	0.0308

表-2 実験因子の直交配列表 $L_8(2^7)$ への割り付け

Run NO.	Col. NO. [1] Grain size d_{50}	Col. NO. [2] Initial profile of beach S_f	Col. NO. [4] Deep-water wave steepness H_o/L_o	Duration time of wave action t	NO.	Remarks	
						$\frac{H_o}{d_{50}}(s/s_o)$ $s_o=1.65$	Water depth (cm)
1-1 -2 -3	$(d_{50})_1^{II}$ $(d_{50})_1^{II}$ $(d_{50})_1^{II}$	$(S_f)_2^I$ $(S_f)_2^{II*}$ $(S_f)_2^{II*}$	$(H_o/L_o)_1^I$ $(H_o/L_o)_2^{II}$ $(H_o/L_o)_1^{II}$	$(t)_1^I, (t)_2^I, (t)_3^I, (t)_4^I, (t)_5^I, (t)_6^I, (t)_7^I$ $(t)_1^{II}, (t)_2^{II}, (t)_3^{II}, (t)_4^{II}, (t)_5^{II}, (t)_6^{II}, (t)_7^{II}$	3	368.4 454.9	45
2-1 -2 -3	$(d_{50})_1^{II}$ $(d_{50})_1^{II}$ $(d_{50})_1^{II}$	$(S_f)_2^I$ $(S_f)_2^{II*}$ $(S_f)_2^{II*}$	$(H_o/L_o)_2^I$ $(H_o/L_o)_1^{II}$ $(H_o/L_o)_1^{II}$		4	454.9 368.4	45
3-1 -2 -3	$(d_{50})_1^{II}$ $(d_{50})_1^{II}$ $(d_{50})_1^{II}$	$(S_f)_1^I$ $(S_f)_1^{II*}$ $(S_f)_1^{II*}$	$(H_o/L_o)_2^I$ $(H_o/L_o)_1^{II}$ $(H_o/L_o)_1^{II}$		2	454.9 368.4	45
4-1 -2 -3	$(d_{50})_1^{II}$ $(d_{50})_1^{II}$ $(d_{50})_1^{II}$	$(S_f)_1^I$ $(S_f)_1^{II*}$ $(S_f)_1^{II*}$	$(H_o/L_o)_1^I$ $(H_o/L_o)_2^{II}$ $(H_o/L_o)_2^{II}$		1	368.4 454.9	45
5-1 -2 -3	$(d_{50})_2^{II}$ $(d_{50})_2^{II}$ $(d_{50})_2^{II}$	$(S_f)_2^I$ $(S_f)_2^{II*}$ $(S_f)_2^{II*}$	$(H_o/L_o)_1^I$ $(H_o/L_o)_2^{II}$ $(H_o/L_o)_2^{II}$		7	46.8 57.7	45
6-1 -2 -3	$(d_{50})_2^{II}$ $(d_{50})_2^{II}$ $(d_{50})_2^{II}$	$(S_f)_2^I$ $(S_f)_2^{II*}$ $(S_f)_2^{II*}$	$(H_o/L_o)_2^I$ $(H_o/L_o)_1^{II}$ $(H_o/L_o)_1^{II}$		8	57.7 46.8	45
7-1 -2 -3	$(d_{50})_2^{II}$ $(d_{50})_2^{II}$ $(d_{50})_2^{II}$	$(S_f)_1^I$ $(S_f)_1^{II*}$ $(S_f)_1^{II*}$	$(H_o/L_o)_1^I$ $(H_o/L_o)_2^{II}$ $(H_o/L_o)_2^{II}$		5	46.7 57.7	45
8-1 -2 -3	$(d_{50})_2^{II}$ $(d_{50})_2^{II}$ $(d_{50})_2^{II}$	$(S_f)_1^I$ $(S_f)_1^{II*}$ $(S_f)_1^{II*}$	$(H_o/L_o)_2^I$ $(H_o/L_o)_1^{II}$ $(H_o/L_o)_1^{II}$	$(t)_1^I, (t)_2^I, (t)_3^I, (t)_4^I, (t)_5^I, (t)_6^I, (t)_7^I$ $(t)_1^{II}, (t)_2^{II}, (t)_3^{II}, (t)_4^{II}, (t)_5^{II}, (t)_6^{II}, (t)_7^{II}$	6	57.7 46.8	45

*: 実験条件 I で, Flat な初期浜勾配を持った海浜に波を 8 時間作用させた後の海浜形状 (Normal beach, Transition type beach, Storm beach).

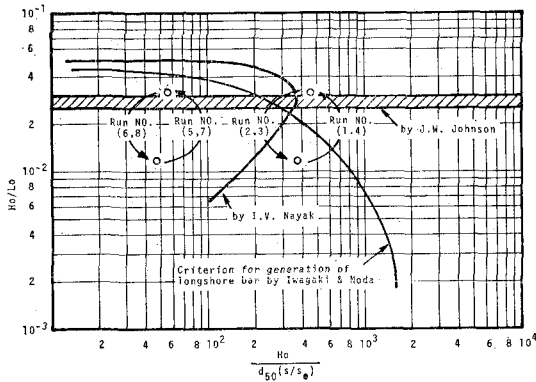


図-3 沿岸砂洲の発生限界, $s_o=1.65$, $s=\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)$

3. 実験装置と実験方法

実験は名城大学理工学部土木工学科の実験造波水槽で行った。実験造波水槽は高さ 1.0m, 幅 0.98m, 長さ 30.0m の鋼鉄製であり, 片面ガラス張りになっている。その一端にリングコーン式無段変速機で Flap 板を駆動

させる造波機が装備されている。

実験方法は表-2にしたがい, I の実験条件の場合, Flat な初期浜勾配を有する模型海浜を設定し, 所定の規則波を作用させた後, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 時間に海浜変形形状を沖方向にポイントゲージを使用して 10 cm 間隔に測定を行った。II の実験条件の場合, I の実験条件でできた海浜変形形状を初期海浜形状として, 所定の波を作用させた後, 測定を行った。この方法で, Run No. 1~8 まで, 3 回の繰返しで順次行った。

4. 実験結果と解析方法について

図-4 は実験結果を整理して, 各波の作用時間での海浜変形形状を示したものである。図-5 は初期海浜形状からの変動量 Δh と波の作用時間 t との関係を無次元数 $\Delta h/L_o$, t/T で整理したものである。

図-5 で, Run No. 3 と 4 の $\Delta h/L_o$ の変化に注目すると, 初期海浜形状の相違が海浜変形過程に影響をおよぼしていることがわかる。この場合, Run No. 3-1 (I) と Run No. 4-1 (II) および, Run No. 3-1 (II) と

Run No. 4-1 (I) とは初期海浜形状 S_f が異なっているのみで、他の実験因子の水準値はすべて同一である。

そこでこれらによる海浜変形過程の相違を推測統計的

に解析するために、初期海浜形状からの無次元海浜変動量 $\Delta h/L_0$ は式 (2) から次のように考えられる。

$$\frac{\Delta h}{L_0} = f_3 \left(\frac{x}{L_0}, \frac{d_{50}}{H_0}, S_f, \frac{H_0}{L_0}, \frac{t}{T} \right) \dots (3)$$

実験結果を解析するには、実験が実験結果を推測統計的に解析しやすくする目的で表-2に基づいて行われているので、実験因子を直ちに解析因子として使用できない。そのため、解析に便利のように、解析因子は式 (3) に従って、実験因子を次のように変換する。

i) d_{50} は d_{50}/H_0 で変換するのが最良であるが、しかし直交配列表の性質上、同一底質粒径に対して独立に沖波波形勾配が変化するので、結局、 d_{50} は $d_{50}/\bar{H}_0$ で変換した。ここで、 $\bar{H}_0 = \frac{(H_0)_1 + (H_0)_2}{2}$ 。したがって、この解析因子には多少の誤差が含まれることになる。

$$\text{解析因子: } A \begin{cases} (A)_1^I: (d_{50})_1^I/\bar{H}_0 = \frac{0.33}{(121+98)/2} = 0.003 \\ (A)_2^I: (d_{50})_2^I/\bar{H}_0 = 0.24 \\ (A)_1^{II}: (d_{50})_1^{II}/\bar{H}_0 = 0.003 \\ (A)_2^{II}: (d_{50})_2^{II}/\bar{H}_0 = 0.24 \end{cases}$$

ii) S_f は実験因子をそのまま解析因子に変換する。

$$\text{解析因子: } B \begin{cases} (B)_1^I: (S_f)_1^I = 1/10 \\ (B)_2^I: (S_f)_2^I = 1/18 \\ (B)_1^{II}: (S_f)_1^{II} = \text{Normal beach,} \\ (B)_2^{II}: (S_f)_2^{II} = \text{Transition type beach, Storm beach} \end{cases}$$

iii) H_0/L_0 は実験因子をそのまま解析因子に変換する。

$$\text{解析因子: } C \begin{cases} (C)_1^I: (H_0/L_0)_1^I = 0.0119 \\ (C)_2^I: (H_0/L_0)_2^I = 0.0308 \\ (C)_1^{II}: (H_0/L_0)_1^{II} = 0.0119 \\ (C)_2^{II}: (H_0/L_0)_2^{II} = 0.0308 \end{cases}$$

iv) t は t/T で変換する。図-5のように、 $0 \leq t/T \leq 12521$ の区間を次の4点に分割した。

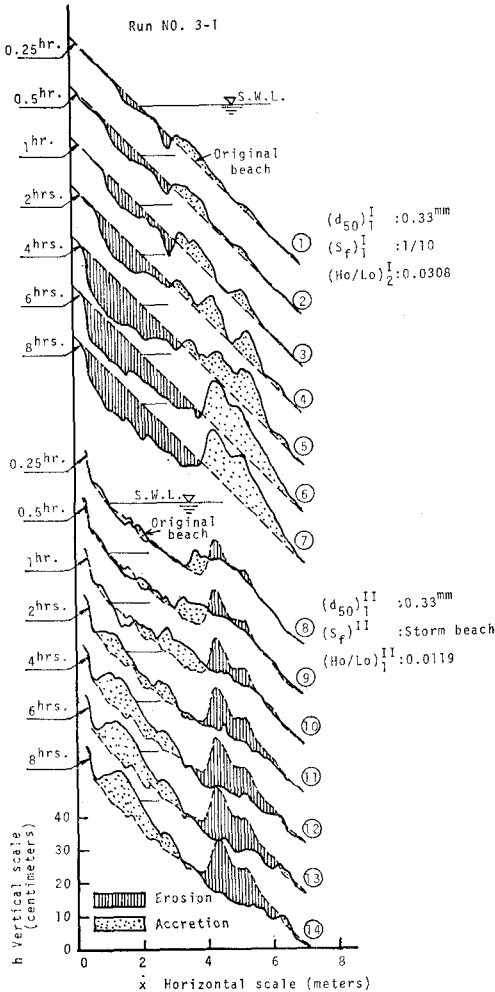


図-4 海浜変形図

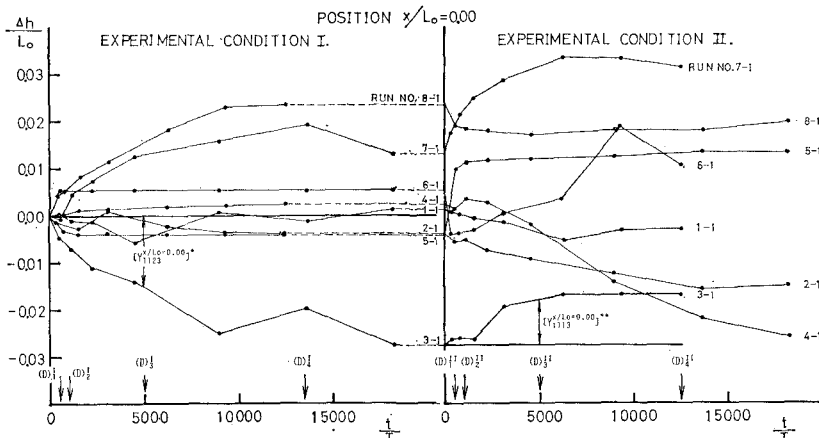


図-5 $\Delta h/L_0$ の時間的变化

$$\text{解析因子: } D \begin{cases} (D)_1^I: (t/T)_1^I = 500 \\ (D)_2^I: (t/T)_2^I = 1000 \\ (D)_3^I: (t/T)_3^I = 5000 \\ (D)_4^I: (t/T)_4^I = 12521 \\ (D)_1^{II}: (t/T)_1^{II} = 500 \\ \dots\dots\dots \\ (D)_4^{II}: (t/T)_4^{II} = 12521 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & + (bd)_{x_2x_4}^* + (cd)_{x_3x_4}^* + (abc)_{x_1x_2x_3}^* \\ & + (abd)_{x_1x_2x_4}^* + (bcd)_{x_2x_3x_4}^* + (abcd)_{x_1x_2x_3x_4}^* \\ & \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

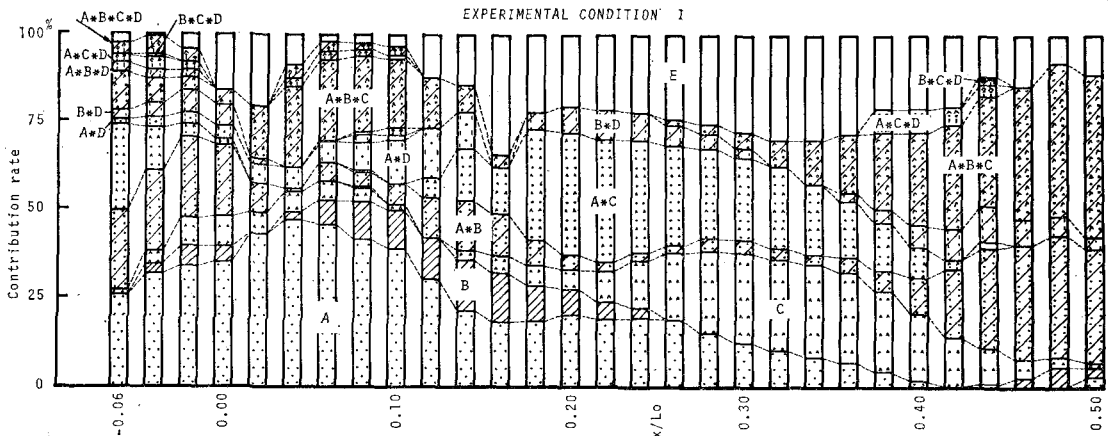
実験条件 II:

$$\begin{aligned} [Y_{x_1x_2x_3x_4}^{x/L_0}]^{**} = & m^{**} + a_{x_1}^{**} + b_{x_2}^{**} + c_{x_3}^{**} + d_{x_4}^{**} \\ & + (ab)_{x_1x_2}^{**} + (ac)_{x_1x_3}^{**} + (ad)_{x_1x_4}^{**} + (bc)_{x_2x_3}^{**} \\ & + (bd)_{x_2x_4}^{**} + (cd)_{x_3x_4}^{**} + (abc)_{x_1x_2x_3}^{**} + (abd)_{x_1x_2x_4}^{**} \\ & + (bcd)_{x_2x_3x_4}^{**} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

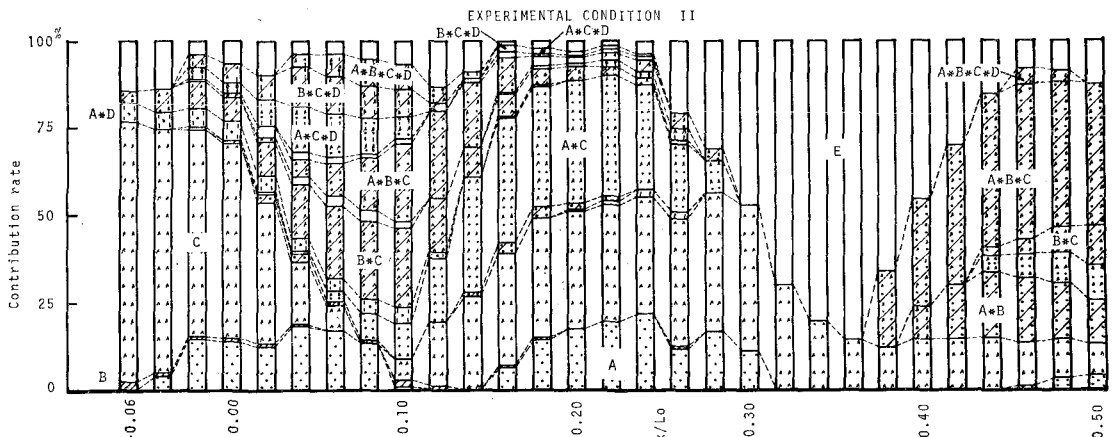
ここで,

$$\begin{aligned} m^{**} \} & \text{一般平均, } a_{x_1}^*, b_{x_2}^*, c_{x_3}^*, d_{x_4}^* \} A, B, C, D \text{ の} \\ m^{**} \} & \text{因子効果, } a_{x_1}^{**}, b_{x_2}^{**}, c_{x_3}^{**}, d_{x_4}^{**} \} \text{因子効果,} \\ (ab)_{x_1x_2}^*, \dots, (cd)_{x_3x_4}^* \} & A*B, \dots, C*D \text{ の 2 因子交互作用効果,} \\ (ab)_{x_1x_2}^{**}, \dots, (cd)_{x_3x_4}^{**} \} & \text{用効果,} \\ (abc)_{x_1x_2x_3}^*, \dots, (bcd)_{x_2x_3x_4}^* \} & A*B*C, \dots, B*C*D \text{ の 3} \\ (abc)_{x_1x_2x_3}^{**}, \dots, (bcd)_{x_2x_3x_4}^{**} \} & \text{因子交互作用効果,} \\ (abcd)_{x_1x_2x_3x_4}^* \} & A*B*C*D \text{ の 因子交互作用効果,} \\ (abcd)_{x_1x_2x_3x_4}^{**} \} & \end{aligned}$$

式(4), (5) に準じて, $-0.06 \leq x/L_0 \leq 0.50$ の範囲で, $x/L_0 = 0.02$ ごとに分散分析を行えば, 各因子効果 $A, B,$



図—6.1 海浜変形過程に寄与する因子の分解図, (実験条件: I)



図—6.2 海浜変形過程に寄与する因子の分解図, (実験条件: II)

$C, D, A*B, \dots A*B*C*D$ が $Y_{x_1 x_2 x_3 x_4}^{x/L_0}$ に与えている影響を寄与率(%)として求められる。この結果を、実験条件 I と II とに分けて、 $-0.06 \leq x/L_0 \leq 0.50$ の範囲で整理すると、図-6 になる。

5. 解析結果と問題点

実験結果を十分な精度で解析することができず、確定的な解析結果は得られなかったが、解析結果の概略を要約すると、次のようである。

1. 因子が海浜変形過程に与える影響は、実験条件 I (以下 I とする) では、 x/L_0 軸方向(沖方向)に大きな変動がなく、平滑的であるが、II では、位置的に集中した影響をおよぼすことである。これは、海浜が波によって、いったんある形状になった後、波形勾配が変化する過渡状態下では因子の作用が集中的であるといえる。
2. A, B, C の単独因子は I と II とで海浜変形過程への影響状態が相違している。その他の2次以上の交互作用因子には顕著な相違が認められなかった。
3. $d_{50}/\bar{H}_0, S_f, H_0/L_0$ の解析因子は実験因子と同様 $L_0(2^7)$ 型直交配列表に割り付けなければならず、それぞれ、2水準に、また t/T は4水準にした。その結果、 H_0/L_0 と t/T については問題ないが、 $d_{50}/\bar{H}_0$ と S_f は多少の誤差を含むことになった。

今後、解析因子を直交配列表に割り付ける際に生じる問題点の解決方法について研究しなければならないと考えている。

なお、この研究の遂行にあたり、松永科学振興財団より援助を受けたことを附記する。ここに附記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 入江 功・天坂三明：漂砂の連続的な現地観測について、——海底地形に関する一考察——，港湾技術研究報告，第10巻，第2号，pp. 53-79, 1971. 5.
- 2) Nayark, I. V.: Equilibrium profiles of model beaches, Proc. of the 12th Coastal Engineering Conference, pp. 1321-1340, Sep. 1970.
- 3) Paul, M. J., Kamphuis, J. W. and Brebner, A.: Similarity of equilibrium beach profiles, Proc. of the 13th Coastal Engineering Conference, pp. 1217-1236, July, 1972.
- 4) Iwagaki, Y. and Noda, H.: Laboratory study of scale effects in two-dimensional beach processes, Proc. of the 8th Conference on Coastal Engineering, pp. 194-210, 1963.
- 5) 田口玄一：実験計画法(上)・(下)，丸善，1962.
- 6) 田口玄一：直交配列表と線点図，丸善，1962.
- 7) 堀川・砂村・鬼頭：波による海浜変形に関する一考察，第20回海岸工学講演会論文集，pp. 357-363, 1973. 11.
- 8) 北川敏男：実験計画法講義(I)・(II)，培風館，1956.
- 9) 土屋義人・吉岡 茂：風波による海浜変形の特性について(1)，——平衡断面形に関する実験的考察——，京大防災研究所年報第14号，pp. 347-360, 昭和47年4月.
- 10) Sheffe, H.: The Analysis of Variance, John Wiley & Sons, Inc., 1959.
- 11) 増田重臣・伊藤政博：実験計画法による海浜変形の研究，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 235-240, 1970.
- 12) 増田重臣・伊藤政博：実験計画法による海浜変形の研究，——高次交互作用について——，第19回海岸工学講演会論文集，pp. 41~45, 1972.
- 13) 中山伊知郎：現代統計学大辞典，東洋経済新報社，1972.