

港湾の埋没に関する実験的研究

京都大学工学部 足 立 昭 平
同 小 合 彬 生

1. 緒 言

砂浜海岸に建設される港湾の弱点は、漂砂による港内埋没である。もちろん海岸にはそれぞれの地理的、気象的特性があり、港湾の形状もまたさまざまであるから、これらを一律に論ずることは困難である。とくに沿岸漂砂のいちじるしい海岸においては、隣接海浜の堆積、浸食が直接港湾埋没に関連し、現象は一層複雑である。したがって港湾埋没を論ずるうえに、隣接海浜の漂砂特性を無視することはできない。しかしながら港内における限定された漂砂の移動は、防波堤による波の回折、護岸、岸壁による波の反射あるいは水深変化による波の屈折に支配され、港湾の形状によつて、特定の沖波に対して、ある固有な港内漂砂分布といったものが存在するであろう。このような港湾の形状と港内漂砂分布との関係もまた港湾埋没を解明するうえに見逃がすことのできない問題である。本研究は防波堤配置の基本形の一つとして波向に直角に設置される直線島堤をとりあげ、その遮蔽水域における汀線の変形を実験的に究明しようと試みたものである。

1. 実験の相似に関する考察

模型実験は幾何学的に縮小された境界条件のもとに生ずる現象から、実際に起こるであろう現象を類推しようとするものであるが、模型にすべての現象を完全に縮尺して再現することは不可能であつて、模型と実物との相似関係については十分の注意が必要である。本研究のように単に水の運動だけでなく、土砂の輸送をともなう場合には、土砂輸送の力学的解明がほとんどなされていないから、模型の相似法則を明確にすることができない。もちろんこのことによつて模型実験の意義が失われるわけではなく、実験の最大の利点は境界条件を単純化し、それを容易に系統づけることにあり、実験結果を過信して、たんに幾何学的に拡張することを避け、系統づけられた条件のもとに得られる実験結果を一つの規範として、実際の現象を観察し、それらの間の相関関係を再確認することが行なわれるならば、多大の費用と労力を要する現地観測をより能率的に遂行でき、さらにまた理論的に現象を洞察するうえにも有益な手掛りを与えることができるのである。

砕波に至るまでの水の波動運動については、摩擦抵抗項を省略することによつて、相当の理論的成果が得られており^{1),2)}、一樣水深あるいは水底勾配がゆるやかである場合に対して、微小振幅波、有限振幅波および孤立波の理論が実用的にかなりの精度をもつことが知られている。このような表面波に関する相似律は Froude の相似則に従い、水平方向と鉛直方向の長さの元を同一に選ぶことによつて、十分な模型相似を期待できる。たとえば最も簡単な浅水における微小振幅の正弦波を例にとれば、その基本的物理量の縮尺は、波高を H 、波長を λ 、周期を T 、波速を c 、水底における水粒子の水平速度を u 、一波長当りの波のエネルギーを E 、単位時間に単位幅当りに輸送される平均エネルギー量を W 、そして水深を h であらわし、添字 m, p, r をもつてそれぞれ模型、実物およびその縮尺比をあらわすと、つぎのようである。

$$c_r = \varepsilon_1 \lambda_r^{1/2}, \quad \lambda_r = \varepsilon_1^2 T_r^2, \quad u_r = H_r / \varepsilon_2 T_r, \quad E_r = H_r^2 \lambda_r, \quad W_r = \varepsilon_3 H_r^2 \lambda_r^{1/2}$$

ここに

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\tanh \frac{2\pi h_m}{\lambda_m} \left/ \tanh \frac{2\pi h_p}{\lambda_p} \right.}, \quad \varepsilon_2 = \sinh \frac{2\pi h_m}{\lambda_m} \left/ \sinh \frac{2\pi h_p}{\lambda_p} \right.,$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{\sinh \frac{4\pi h_m}{\lambda_m} + 4\pi \frac{h_m}{\lambda_m}}{\sinh \frac{4\pi h_p}{\lambda_p} + 4\pi \frac{h_p}{\lambda_p}}$$

鉛直方向および水平方向の長さの元はそれぞれ H および λ で、時間の元は T で代表され、 $H_r = \lambda_r$ であれば無条件に $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 1$ であつて、 $T_r = H_r^{1/2} = \lambda_r^{1/2}$ がこれら諸量の相似条件を与える。 $H_r \neq \lambda_r$ すなわち模型がひずめられる場合には、一般に $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ が一定値をとらないから、その相似条件は限られた範囲に対して近似的に得られるだけである。ただし模型と実物との両者とも長波 ($h/\lambda < 1/25$) の場合には、 $\varepsilon_1 \doteq \varepsilon_2^{1/2} \doteq H_r/\lambda_r$ 、 $\varepsilon_3 \doteq 1$ で

あつて、 $T_r = \lambda_r H_r^{-1/2}$ が得られ、また両者とも深水波 ($h/\lambda > 1/2$) の場合には、 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 1$ となり、いずれも Froude の相似則に規定される。

有限振幅波および孤立波に対しても、同様にして、 $H_r = \lambda_r$ に選ぶならば、 $T_r = H_r^{1/2} = \lambda_r^{1/2}$ が相似条件式となり、Froude の相似則に従うことが見出せる。波の回折、屈折に対しても、まず同様の相似則が適用されると考えてよいであろう。

つぎに砕波後の水の運動は、漂砂量を直接的に支配するものであるが、ここではもはや水底摩擦を無視することができないし、また浸透効果などの影響が加わるから、上記の表面波に対する相似条件だけでは不十分である。しかし砕波直前の波の特性が相似であることは、この場合の必要条件であり、いま砕波後の波の峰線あるいは流れの前端線などの定性的動向だけで満足することにすれば、さしあたつては、表面波の相似条件によつて一応の目的を達成できるであろう。事実従来の研究³⁾によれば、全漂砂移動量の約 80% を占める砕波後の水域内にある漂砂移動分布、またそこに形成される海浜平衡勾配は定性的には全く沖波の特性によつて特徴づけられている。

漂砂に関する相似条件は、砕波後の水の運動機構さえも解明されていない現状において、それを明確に求めることは不可能である。しかしながら漂砂の輸送形式は、沿岸潮流の激しいような特別の場合を除いて、大部分が掃流であり、波動 1 周期の間に移動する単位幅当りの漂砂量 q と、底質材料の粒径 d 、密度 δ 、水の密度 ρ および水底に作用するせん断力 τ との間に関数関係のあることを期待できる。もちろんこの関数形は未知であり、模型と実物とについても、かならずしも同一ではないであろう。

いま水底地形の変形に関する連続条件を考えると、 q の x, y 成分をそれぞれ X, Y であらわして

$$\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} = \int_T \frac{\partial h}{\partial t} dt$$

である。この連続条件に対して模型と実物との間に相似関係が成立するためには

$$\frac{X_m}{X_p} \cdot \frac{L_p}{L_m} = \frac{Y_m}{Y_p} \cdot \frac{L_p}{L_m} = \int_{T_m} \frac{\partial h_m}{\partial t_m} dt \bigg/ \int_{T_p} \frac{\partial h_p}{\partial t_p} dt$$

でなければならない。ここに L は水平方向の長さを、 h は水深を、 T は波の周期をそして t は地形の変形する時間をあらわし、添字 m, p はそれぞれ模型と実物をあらわす。 $X_m/X_p = Y_m/Y_p = q_m/q_p$ の第一条件は一応満足されると考えてよいであろうから、結局相似の条件は

$$\frac{q_m}{q_p} = \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{\bar{h}_m}{\bar{h}_p} \cdot \frac{T_m}{T_p} \cdot \frac{t_p}{t_m} \quad (\bar{h} \text{ は 1 周期 } T \text{ 時間の平均値をあらわす})$$

あるいは添字 r を用いて縮尺比をあらわして

$$q_r = L_r \cdot H_r \cdot T_r \cdot t_r^{-1} \quad (1)$$

である。 L_r と H_r および T_r と t_r とをそれぞれ同一の元を選ぶと、(1) 式は $q_r = L_r^2$ であつて、 q の関数形から、模型に用いるべき d_m, δ_m および ρ_m が合理的に決定されるはずである。しかし現実には q の関数形が未知であるから、それらを求めることはできない。

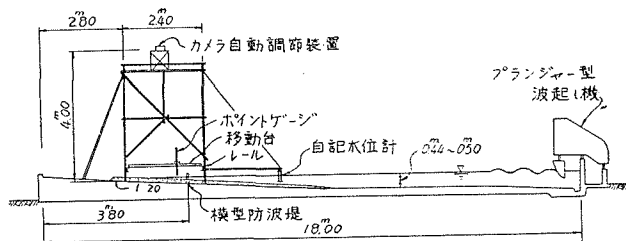
そこで最初に模型の d_m, δ_m および ρ_m を適当に選定することにすれば、 q_r はその明確な値はわからないが、ともかくある値に決定されてしまう (一般には q_r は単に L_r, T_r だけの関数でなく、 L_m, T_m すなわち模型の規模によつても異なり、かならずしも一定値ではないであろう)。したがつて条件式 (1) において、左辺の値が独立に与えられてしまうから、この式が成立するためには、 L_r と H_r あるいは T_r と t_r の元を同一に選ぶことはできないのが普通であろう。しかし L_r と H_r に対しては、さきに述べたように同一元であることが望まれるから、結局 T_r と t_r の元が異なるとしなければならない。すなわちこの場合には、時間の縮尺比は波の運動に関する T_r と、地形変形に関する t_r と同一でなく、前者は Froude の相似則によつて与えられるが、後者は砕波後の水の運動、漂砂輸送機構などのすべての未知の関係を背負わされており、現状においてはその値は実証的に推定するほかない。そしてまた模型の d_m, δ_m の選定は、そのいずれもが、極端に小さいと、土砂輸送の形式が実物と全くかけはなれてしまうおそれがあり、その適当な選定ということも現在のわれわれの知識では明確でないのであつて、それぞれの実験担当者の経験に頼らざるを得ない。

なお水底地形の変形の基点は、厳密には波によつて水底土砂がはじめて移動を開始するような地点を選ばねばならないが、そのような地点の漂砂量はごく少量であつて、海浜変形におよぼす影響は少ないと考えられるからここでは多少移動していても、実際上海浜変形に影響のないと推定される点を漂砂移動限界として十分であろう。このような点の限界水深は、岩垣・榎木両氏⁴⁾によれば、底質の粒径よりもむしろ沖波の波形勾配にの影響が顕著であると報告されている。

3. 実験装置

実験水槽は屋外扇形水槽³⁾を幅 7 m に仕切つて用い、プランジャー波起し機から 14.00 m の位置にそれと平行に模型防波堤を設置した。模型防波堤は長さ 50 cm、幅 10 cm、高さ 30 cm のコンクリートブロック 4 コをモルタルで継ぎ合わせた直立堤で、その全長は 2.00 m である。水槽断面は図-1 に示すようであるが、海底地形は 1/20 勾配の固定床に、平均粒径 0.4 mm のほぼ均一な細砂を約 10 cm 厚に敷き詰めて形成し、幅 7 m にわたつて、むらなく砂面を均し、各実験の初期条件を同一にするために、70 mm 溝型鋼をガイド レールとして移動台を取りつけた。この移動台はまた水位および

図-1 実験水槽



地形測量用のポイント ゲージの基面を与えるものでもある。さらにレールの支柱をかねて足場鋼管を用い、高さ 3.60 m の観測台を組立て、この観測台の上面に、任意の一定間隔をもつて自動的に写真撮影のできる装置を取りつけ、広角レンズを使用して、3.50×2.40 m の水域面積のふ観写真を連続的に撮影し、波の回折、屈折および

海浜変形を測定した。水位および波高の測定は、電気抵抗式の自記波高計とネオン ランプの点滅による直接測定とを併用し、沖波の特性を見出した。しかし今回の一連の実験においては、防波堤の影響による港内波高分布の測定は行なっていない。

実験は防波堤を固定して、波の特性と水位を変えることによつて、防波堤の長さ、その設置点の水深および離岸距離を沖波に対して相対的に変化せしめた。なおプランジャー型波起し機の特長として、水位とプランジャー振幅を一定に保つと、周期が変わつても、起される波のエネルギーがほぼ一定である。このことは実験条件の組み合わせに一つの基準を与えてくれた。現在までに終了した実験数は 10 の場合であり、沖波特性は波形勾配 0.01 から 0.08 まで、また水位は水槽の沖側で 44 cm から 50 cm まで 3 つの場合を選び、また砂面の初期勾配は 1/20 である。

4. 実験結果

防波堤は波向に直角に固定してあるから、図-2 に示すように防波堤の一端に原点をおき、 x, y 軸をそれぞれ入射波向および防波堤の内側に沿つてとることとする。地点 (x, y) における水深を h とすれば、これに対して独立に選ばれる基本量は、沖波の特性として沖波波長 λ_0 、波高 H_0 、地形的要素として防波堤の長さ $2B$ 、防波堤位置の初期水深 h_0 、初期水底勾配 i 、経過時間 t 、底質の要素として砂の粒径 d 、密度 δ 、さらに水の密度 ρ と重力の加速度 g である。本実験では底質の砂は一定であるからこれを一応考察のそとにおくことにすれば

$$\varphi_1(H_0, \lambda_0, h_0, B, i, g, x, y, t, h) = 0$$

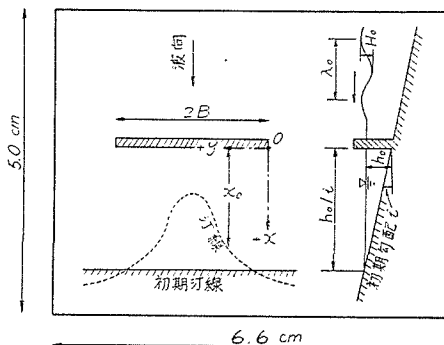
また次元解析から

$$\varphi_2\left(H_0/\lambda_0, h_0/H_0, B/\lambda_0, i, x/\lambda_0, y/\lambda_0, t/\sqrt{\frac{2\pi\lambda_0}{g}}, h/H_0\right) = 0$$

と考えることができる。したがつてこの実験においては $H_0/\lambda_0, h_0/H_0, B/\lambda_0, t/\sqrt{2\pi\lambda_0/g}$ および i の 5 つの因子が実験条件として与えられる。しかし各因子はそれぞれの意味を有しており、たとえば海浜の平衡勾配の 2 つの様相、正常海浜と暴風海浜の分類の目安は、 $H_0/\lambda_0 = 0.025 \sim 0.030$ の値によつて、防波堤の位置と碎波点との関係は、 $h_0/H_0 = 1.1 \sim 1.5$ の値によつて、いずれが岸側にあるかを見当づけることができよう。また防波堤の遮蔽水域の広さは $B/\lambda_0, i$ によつてあらわされるのであるが、防波堤と初期汀線との距離に対する沖波波長あるいは防波堤長との比は $H_0/\lambda_0, h_0/\lambda_0$ を組み合わせることによつて容易に得られ $(h_0/i\lambda_0), (Bi/h_0)$ などの形に変形することもできる。また $\sqrt{\frac{2\pi\lambda_0}{g}}$ は波の周期 T をあらわし、 $t/\sqrt{2\pi\lambda_0/g}$ は来襲した波の数をあらわしている。

実験はなお予備実験の段階を終了したにすぎないので、これらの諸因子の具体的役割を見出すまでには至つて

図-2 模型防波堤に対する座標



いないのであるが、以下これらの因子を念頭において、若干の結果を述べてみたい。

(1) トンボロの発生限界 トンボロの定義は、土砂、砂礫によつて形成される細い帯状の土地、すなわち砂洲であるが、スピッツとの区別は、トンボロの先端には島があることでなされる。そして島堤に遮蔽された水域に形成される舌状の砂洲が、その典型的例である。このようなトンボロの発生について、Souvage de Sainte Marc 氏ら⁹⁾はモミのオガクズを使用した実験を行ない、その発生を支配する最も重要な因子は、汀線から島堤までの距離と沖波波長との比 $h_0/i\lambda_0$ であることを見出し、この値がある限界値より大きい場合には、汀線は平行に前進すると述べ、 $h_0/\lambda_0=0.1$, $B/\lambda_0=0.5$ の場合の限界値は $h_0/i\lambda_0=1.25$ であるとしている。著者の実験においては、底質は細砂であり、実験の範囲も $h_0/\lambda_0=0.01\sim 0.08$, $B/\lambda_0=0.4\sim 0.9$, $h_0/i\lambda_0=0.04\sim 1.20$ であるが、いずれの実験もトンボロが形成を見た。この結果は一見 Sourage 氏らの限界内にあるようにも見えるのであるが、他の因子が全く異なる値をもつ場合であるから一概にはいえない。また次項に述べるように多くの場合 ($H_0/\lambda_0>0.03$ と考えられる) 防波堤による遮蔽域内の汀線は、遮蔽域外の汀線が一応の平衡点に達してから前進するのであるが、トンボロ発生に先き立つて、水面下に潜在的土砂堆積を生じ、實際上汀線の局所的な前進時間を判定するのは困難である。

(2) 汀線の変動 図-3 a,b,b',c,d,e は汀線位置 x_0 の時間的変動例を示しており、これらの実験条件は表-1 のようである。

図-3 汀線の変動

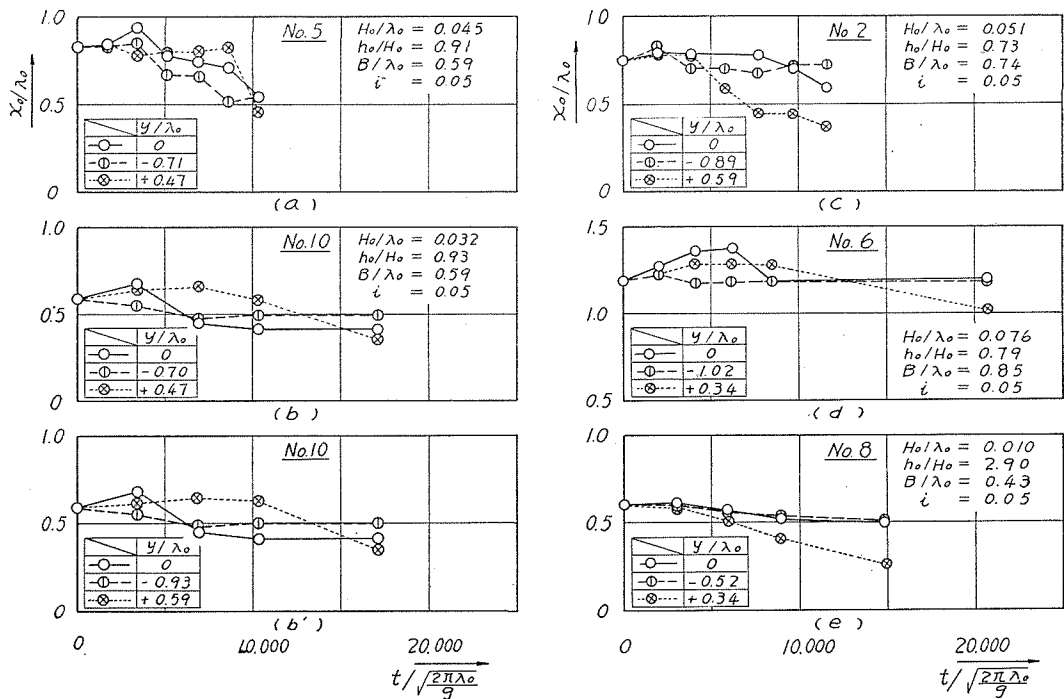


表-1 実験種別

実験番号	H_0/λ_0	h_0/H_0	B/λ_0	$h_0/i\lambda_0$	Bi/h_0	摘 要
No. 2	0.051	0.73	0.74	0.74	1.00	図-3 e
No. 5	0.045	0.91	0.59	0.83	0.71	図-3 a
No. 6	0.076	0.79	0.85	1.19	0.71	図-3 d, 写真-1 c
No. 7	0.034	1.19	0.79	0.79	1.00	写真-2 b
No. 8	0.010	2.92	0.43	0.60	0.71	図-3 e, 写真-1 a
No. 9	0.030	1.73	0.59	1.06	0.56	写真-1 b
No. 10	0.032	0.93	0.59	0.59	1.00	図-3 b, b', 写真-2 a

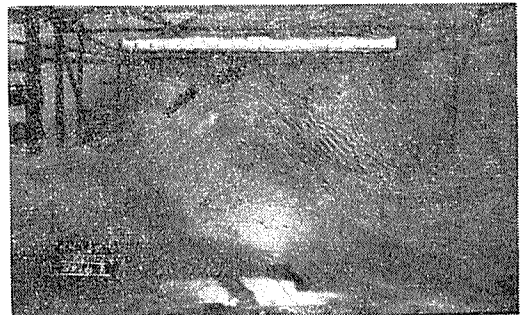
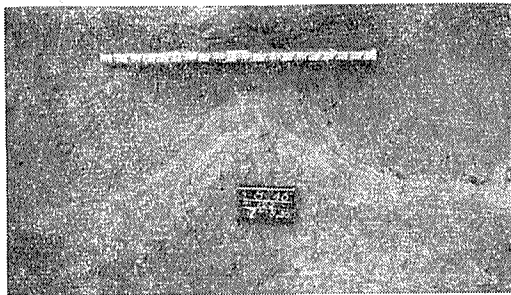
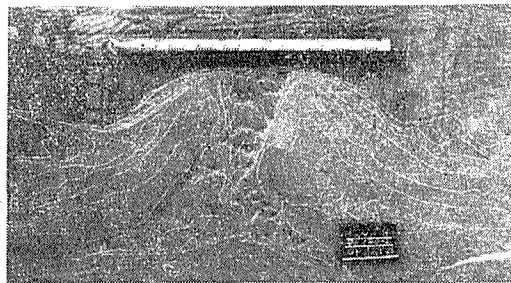
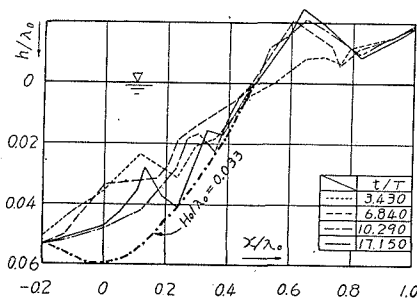
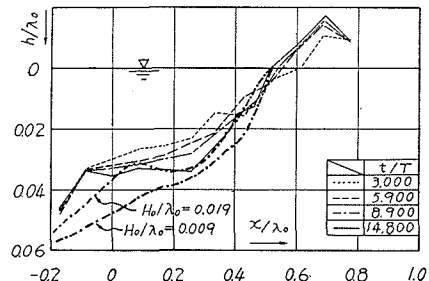
いま 図-2 に示した座標系において $x>0$, $y>0$ の遮蔽域を港内、その外の水域を港外と呼ぶことにする。まず港内 (y/λ_0 が正) 港外 (y/λ_0 が負) における汀線の遷移状況を比較すると、港外の汀線はいずれも実験開始とともに徐々に前進を始め、比較的短時間で一応の平衡点に達するように見える。なお図にはあらわしていないが、汀線の変動は緩慢ながらその後も続き、完全な平衡点に達するのはトンボロが、最終形状にまで発達した後であ

る。一方港内の汀線の変動は、図-3eを除けば実験開始後しばらくは変化なく、むしろ防波堤中央部付近においては、堤防両端から回折してくる波の干渉によつて、かなり強い向岸流を生じ、汀線は後退する。そして港外の汀線が一応の平衡点に達すると、急激に前進を始めている。図-3eの場合は変化が非常に滑らかに進んでおり、実験条件がその他のものと異なるためと考えられる。いま表-1からその特性的因子を探しだすならば、沖波波形勾配 H_0/λ_0 と碎波点の相対位置をあらわす h_0/H_0 をあげることができよう。しかし h_0/H_0 について実験 No. 9 も値に差はあるけれども、まず同じ範疇にあるとすればこれは H_0/λ_0 の特性にしてみたい誘惑にかられる。もちろん唯一の実験から断定してしまうことはできないけれども、もしこのことが海浜勾配の正常、暴風両海浜の二様相と相対応するやうなものであるならば、非常に興味ある問題である。

つぎに汀線の変動速度であるが、実験の初期においては見かけ上汀線が固定していても、水底地形は決して静止状態にあるわけではなく、水面下では常に汀線の潜在的変形が起つているから、図-3の曲線群の勾配だけを問題にすることはできない。地形の変形速度はすでに2.に述べたように模型相似律を打解するための要件であり、基本因子との対応関係を求めることは、きわめて重要である。しかしながら数少ない実験から強引な判定を下すことは、すこぶる危険であるから、ここでは二、三の写真を掲げ、さきに述べた基本因子がほとんど同程度の影響力をもつように見えることを示し、汀線の変動については、港内と港外との特徴的差異を指摘するにとどめる。

 写真-1 $t/T=20700$ におけるトンボロ形成過程

 (a) 実験 No. 8 ($H_0/\lambda_0=0.010$)

 (b) 実験 No. 9 ($H_0/\lambda_0=0.030$)

 (c) 実験 No. 6 ($H_0/\lambda_0=0.076$)

 図-4 (a) 実験 No. 10 ($H_0/\lambda_0=0.032$), $y/\lambda_0=-0.70$ の海浜勾配の変遷

 図-4 (b) 実験 No. 8 ($H_0/\lambda_0=0.010$), $y/\lambda_0=-0.52$ の海浜勾配の変遷


(3) 海浜勾配 港外水域の海浜勾配に、どの程度の防波堤の影響があらわれるであろうかという疑問から、

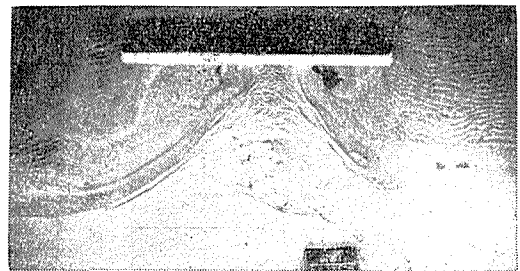
港外海滨勾配を、従来の二次元平衡勾配の実験結果⁷⁾と比較したものが、図—4 (a) および (b) である。これを図—3 (b), (c) に対比させると、汀線前進がにぶる時間は丁度、人為的に作った初期勾配が、その沖波特性に応じた平衡勾配に達する時間と一致することが明らかである。港外海底勾配の変化から、港内漂砂の補給源となる水域範囲を得ようとした試みは、測量範囲が十分に広くなかつたため成功しなかつたのであるが、比較的防波堤近くの地点までの海滨勾配が沖波特性に強く影響をうけているようであり、港外海底地形は初め一応の平衡勾配に達すると、その後はその勾配のままで平行に岸側に移動し、港内トンボロ形成の土砂を供給するようである。

(4) トンボロの平衡形状 写真—2 (a) は実験 No. 10 の 8 時間 ($t/T=27\ 400$) のトンボロを示すのであるが、この場合、以後 16 時間 ($t/T=55\ 000$) まで実験を続けたがその形状には大きな変化が認められず、この形が最終形と断定してもよく、トンボロの平衡形の存在が確認された。写真—2 (b) は実験 No. 7 の 17 時間 ($t/T=68\ 000$) のトンボロであるが、この場合、トンボロは進行状態にあり、20 時間 ($t/T=80\ 000$) に至つても、なお進行性を示した。両者の差は表—1 に掲げたように港内面積に関する因子 ($h_0/i\lambda_0$) および (B/λ_0) に差があり、また砕波点に関する (h_0/H_0) にも若干の差がある。さてトンボロの終局的平衡形状は防波堤による波の回折と、その後の波高分布に支配されるが、今回の実験ではいずれも同一の曲率をもつた弓状の平衡汀線が画けるようである。実験回数が十分でないから、なお検討の余地はあろうが、このことは港内埋没の予知に重要な示唆を与えるものであろう。

写真—2 トンボロの形成

(a) 実験 No. 10 ($H_0/\lambda_0=0.032$) $t/T=27\ 400$

(b) 実験 No. 7 ($H_0/\lambda_0=0.034$) $t/T=68\ 000$



5. 結 言

以上、島堤の遮蔽水域の埋没に関して、予備実験的事項を述べたのであるが、港湾建設の施工は一般に主風向に対する島堤から築造される場合が多く、とくに小漁港などにおいては、その島堤のまま長年月放置される場合が少なくないように思われる。しかし砂浜海岸の島堤にはトンボロ形成がほとんど必然的に起こり、多くの埋没港湾の歴史には、この舌状の砂洲の記述が必ず記載されているといつても過言ではないようである。本研究はなお着手して日浅く、ほとんどすべての問題点が未知であるが、問題の所在を明らかにし、今後の研究の進展に資せんとするものである。

おわりに、本研究は文部省科学研究補助金によつて遂行されたことを付記して感謝の意を表するとともに、実験の準備ならびに観測をともにした、京大技術員 久下元一氏、学生 山口基郎君ならびに飯間 仁君に深甚なる謝意と敬意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎, 本間 仁編: 応用水理学, 上, 昭32.4, pp. 126—159.
- 2) 同 上, 中II, 昭33.4, pp. 492—548.
- 3) 同 上, 中I, 昭33.1, pp. 107—124.
- 4) 同 上, 中I, 昭33.1, p. 112.
- 5) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 鈴木雄太: 海岸堤防の設計, とくにその有効高について, 海岸工学講演会講演集, 昭.30.11 pp. 57~70
- 6) Sauvage de Sainte Marc, M.G. and Vincent M.G.: Transport Littoral Formation de Fleches et de Tombolos, Proc. 5th Conference Coastal Engg., 1954, pp. 296—328
- 7) 岩垣雄一, 榎木享: 海滨の平衡勾配と砕波による砂移動に関する実験, 海岸工学講演会講演集, 昭.30.11.