

7 沿岸漂砂に及ぼす海岸構造物の影響 (第1報)

京都大学大学院 榎木 亨

1. 緒言

従来の研究^(1,2)によれば、漂砂による海岸変形のうち、波の変化にともなう短期間の変形は海岸線に直角方向の漂砂に支配され、1年あるいは数年またはそれ以上の長期間の変形は、沈降海岸など特別な場合³⁾を除くと、沿岸方向の漂砂に左右されるものと考えられている。海岸に防砂堤、防波堤、離岸堤および護岸堤防などの海岸構造物を計画する場合には、これらの構造物によって海岸が将来どのような変形をするかを推定すること、換言すれば沿岸漂砂に及ぼすこれらの構造物の影響を明らかにすることが、海岸の浸食防止および構造物の機能維持の上からきわめて重要である。しかし、沿岸漂砂の影響については、それぞれの海岸構造物の機能の相違からみて、一律に論じがたいことはいうまでもない。

海岸構造物の影響については、従来定性的ないしは定量的に数多くの研究^{(4)~(8)}が行われているが、主として防砂堤、海岸水制および導流堤を対象としたものであって、離岸堤や護岸堤防を対象としたものは比較的少ないようである。しかし、離岸堤は泊地および海岸の防護を目的として使用されており、その沿岸漂砂に及ぼす影響は非常に大きいようである。この離岸堤の影響を明らかにするには、(1) 沿岸漂砂の方向および量、(2) 沿岸漂砂移動帯の範囲、などを考慮して、解析していかなねばならないが、沿岸漂砂の移動に最も重要な要素は、波の沿岸方向のエネルギーおよび沿岸流速と底質とであり、とくに離岸堤を有する海岸の特性に即応した沿岸流速の分布を把握することが必要である。こうした沿岸流速の実態を知るためには、海岸における波の特性の変化や海底地形などを明らかにしなければならない。

本論文においては、沿岸漂砂の方向が一様な海岸に離岸堤を設けた場合の沿岸漂砂の移動変化にともなう海岸変形について、京都府宮津海岸における実測と京大防災研究所における扇形水槽による実験とにもとづいて、定性的に解析を試みることにしたのである。

2. 屈折および回折にともなう碎波高の変化

沿岸漂砂を生ぜしめる波は、沖からある角度をもって来襲し、屈折して海岸にやってくる。この場合、海岸線近くに離岸堤があると、屈折波はさらに構造物による回折作用を受けて、その水域内の波高、入射角、碎波水深に変化を与え、波にともなう沿岸流速の分布が変ってくる。前に述べたようにこの沿岸流速は、離岸堤による遮蔽水域の漂砂を推定する重要な要素であり、碎波高、碎波水深、波の入射角によって推算されるから、遮蔽水域^(9,10)における海岸変形を求めるためには、屈折と回折とを受ける場合の碎波の特性を知らなければならない。

いま、水深 h の点の波高を H 、屈折および回折をしないと考える場合の相当沖波波高を H_0 、沖波の波長を L_0 、碎波高を H_b 、碎波水深を h_b とすれば

$$H/H_0' = f(h/L_0), \quad H_b/H_0' = f'(h_b/L_0) \quad \text{----- (1)}$$

なる関係がある。上式中の H および H_b' は、屈折および回折の影響を受けるところでは、つぎのようにあらわされる。

$$H/H_0 = K f(h/L_0), \quad H_b/H = K_b' \quad \text{----- (2)}$$

ここに K は水深 h の点における屈折係数、 K_b' は碎波点の回折係数である。したがって、

$$H_b/H_0 = K K_b' f(h/L_0) = K K_b' \{f(h/L_0)/f'(h_b/L_0)\} f'(h_b/L_0) \quad \text{----- (3)}$$

となり、(1) 式の関係を代入して次式がえられる。

$$H_0' = K K_b' \{f(h/L_0)/f'(h_b/L_0)\}^2 H_0 \quad \text{----- (4)}$$

(3) 式または (4) 式における $K K_b'$ は水深の函数であり、また f も水深の函数であるから、 H_0/L_0 を与えるだけで H_b/H_0 を求めることができない。したがって各周期ごとには回折現象を受ける水域内の各地点について、 H_0/L_0 と h_b/L_0 および $K K_b'$ との関係をおかなくてはならない。これらの三つの無次元量の関係を求めるには、つぎの順序によればよい。すなわち、

(1) 周期 T または沖波波長 L_0 と碎波水深 h_b を仮定する。

(2) 各周期、各碎波水深について、 H_0/L_0 および $H_b/H_0 = f'(h_b/L_0)$ と離岸堤両端の水深 h に対する $H/H_0' = f(h/L_0)$ とを求める。

(3) 仮定した h_b における屈折係数および回折係数も、それぞれ屈折図および回折図を用いて算定する。

(4) 前二項で求めた値を用いて 最初に仮定した碎波水深ともつような沖波の波形勾配 H_0/L_0 を求めるが、そのためには (4) 式からえられる次式によればよい。

$$H_0/L_0 = (H_0'/L_0) (1/K K_b') \{f(h_b/L_0)/f(h/L_0)\} \quad \text{----- (5)}$$

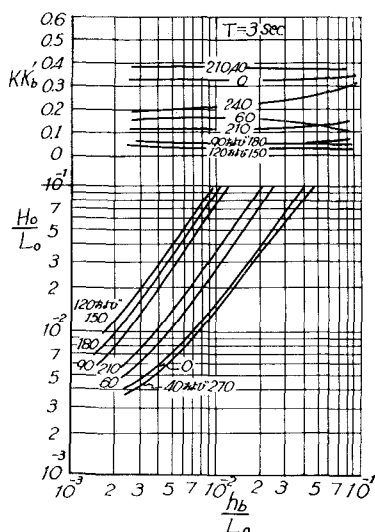


図-1 官津海岸における H_0/L_0 , h_b/L_0 および $K K_b'$ の間の関係。

図-2 に示す官津海岸江尻漁港防波堤(島堤)による遮蔽水域内の各地点について、上述の順序によって求めた H_0/L_0 , h_b/L_0 および $K K_b'$ の関係を例示すれば、図-1 に示すとおりである。この計算では半無限島堤に対する回折図を用いたが、実際の防波堤は半無限堤ではなく有限の島堤であるから、両端における等 K' 線が重要であらうことになる。この問題については田中博士が理論的解析を行われに⁽¹³⁾が、計算が非常に複雑になるから、ここでは Putnam⁽¹⁴⁾が述べているように、近似的に島堤両端についての値を加えあわし それとその他の回折係数として計算を進めることにした。

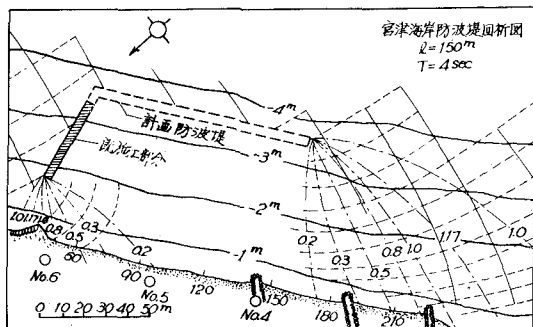


図-2 官津海岸 江尻漁港の防波堤概略図

3. 遮蔽水域の沿岸流速分布と地形変化

前節で述べたように、防波堤(雄岸堤)によって回折現象を受ける水域内では、ある位置を除いて一般に波高を減少し、碎波にもなつて生じる漂砂の移動量も変化してくる。この沿岸漂砂の移動は、主として碎波にもなつて沿岸流速によるものと考えられ、漂砂の移動沈澱にもとづく地形の変化あるいは汀線の前退後退は、この沿岸流速の分布によって推定することができよう。すなわち、沿岸流速が増加すれば沿岸漂砂量が増し、反対に流速が減少すれば漂砂量も減るは明であるから、¹⁵⁾沿岸流速の向う方向に流速が増大していくと侵食され、反対に減少していくと堆積すると考えてよい。こうした流速分布による海岸変形の推定方法の妥当性について、著者が宮津海岸で行った実測結果と防災研究所で行った実験結果ともについて検討を加えよう。

1) 宮津海岸における実測結果 宮津海岸は、日本海に向つて湾口を東北方に開いた宮津湾の西岸にある。湾内には日本の代表的なサンドスピットともいふべき名勝「天の橋立」を有し、その海底地形は汀線にほぼ平行な等深線をもっている。この海岸の漂砂は、海岸線と85°の入射角をもつて湾口から侵入してくる卓越波に左右せられ、北から南の方向に主として移動しているようである。なお、風の資料から推定して、これらの波は3~7 secの周期をもつと考えられ、この水域に図-2のような船溜を目的とした島状防波堤が計画され、一部施工されている。したがつて現在の沿岸漂砂の移動がこの防波堤によって変化し、その南側(遮蔽部分)の海岸地形に大きい影響を及ぼすものと考えられるので、著者らは前節で述べた波高変化と沿岸流速とから地形変化を推定するとともに、一部施工されている島状防波堤による地形変化を実測して、この領域における侵食堆積量を算定することにした。

まず、沿岸流速算定(V)にあつては、InmanおよびQuinn⁹⁾が多くの実験実測の資料にもとづいて求めた摩擦係数の実験式

$$R = 0.00404 V^{-3/2}, \quad (m\text{-sec 単位})$$

を用いて計算した流速が過大な値を示しているので、まず(6)式の再検討を行うことにした。このために実測した H_b, α_b および T を用いて、Putnam, Munk および Taylor¹⁰⁾の式から R を逆算し、この R と V の実測値との関係をお求めたのが図-3である。この図は横軸に沿岸流速(ft/sec)縦軸に R の値がとつてあるが実測値は宮津海岸で底質の異なる2地奥と東南海岸($d_m = 2 \sim 3 \text{ mm}$)とで得られた値であり、底質の影響はあまりないようにはみられるが、(6)式とは全然一致していない。この不一致の理由は明らかでないが、沿岸流速の測定方法の相違ということも大きい原因でないかと思われる。そこで著者らはその実験値にもとづいて新たに実験式

$$R = 0.0249 V^{-3/2}, \quad (m\text{-sec 単位}) \dots (7)$$

をつくり、これによって沿岸流速を算定することにした。

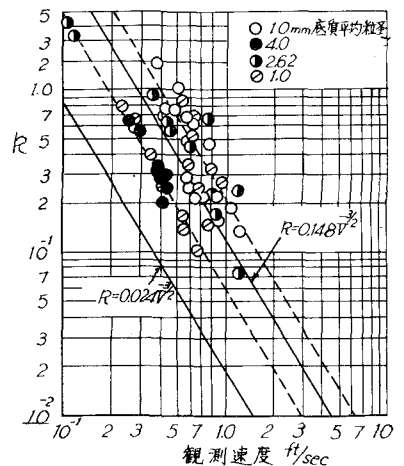


図-3 摩擦係数と沿岸流速との関係

図-2に示す防波堤の計画延長150mの場合について、各周期各波形勾配に対する沿岸流速の分布を(7)式によって計算した結果は図-4のとおりであつて、この流速分布から推定した浸食・堆積の範囲も図示されている。

以上の推定結果の妥当性を確かめるために、延長30mの既設防波堤付近の実測を行い、各断面の単位巾当りの浸食量・堆積量を縦軸に、距離を横軸にとってあらわしたのが図-5である。図-4および図-5に示す測点番号は図-2にその位置があらわされている。この海岸では防波堤の直後から防砂堤が50m間隔に設けられており、図-5に示す測定結果にはこの防砂堤による効果も含まれている。したがつてNo.8, No.7, No.3の3ヶ所でかなり堆積量が増しているのは防砂堤の影響と考えられるが、この防砂堤の影響を取り除いた結果は図に点線と示したとおりである。前節でえられた砕波高および砕波水深を用い、防波堤延長が30mの場合について、Putnam, Munk および Traylor の式によつて $T=5\text{sec}$, $H_o/L_o=0.03$ と $T=4\text{sec}$, $H_o/L_o=0.01$

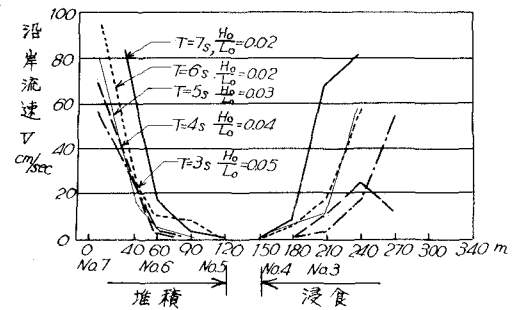


図-4 延長150mの防波堤完成後における沿岸流速分布と堆積・浸食の傾向。

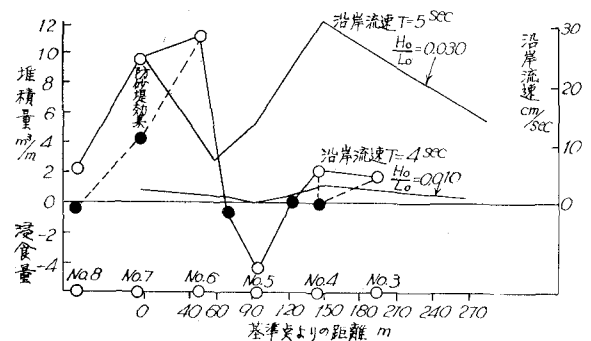


図-5 浸食・堆積量の分布と沿岸流速

の二つの波にとりあつて沿岸流速を算定し、図-5にその流速分布を記して浸食・堆積部分を推定した結果は、上記の実測結果と非常によく一致しているもので、われわれの沿岸流速分布による推定法が妥当であることがわかつたわけである。

この場合、既設防波堤は波の進行方向とはほぼ直角となしているので、つぎの(2)の実験で示すように、島状防波堤の陸端と岸との間にトポロギが發生し、半島堤のようになっていく傾向を示す。しかし、半島堤になろうとする發生速度には、構造物の設置位置が大きく影響するようであつて、設置位置と砕波水深および砂の移動限界との関係が重要な因子となるものと思われる。宮津海老の場合、防波堤のときの最深水深は1.85mであり、各周期各波形勾配の波に対する砂の移動限界水深は表-1のとおりである。

風速12 m/secで継続時間9 hr程度の風に対しては、 $T=4.2\text{sec}$, $H_o/L_o=0.015$ 程度の波が發生するから、表-1からわかるように、防波堤端の水深は限界水深よりも深いはずである。しかし、このことは離岸堤の半島堤化を防ぐものではなく、その堆積速度に影響するだけのものと考えられる。この離岸堤の設置水深と汀線前進速度および堆積速度と

表-1 砂の移動限界水深 (m)

H_o/L_o	0.005	0.010	0.020	0.030	0.050	0.080
3 sec	0.08	0.13	0.20	0.27	0.39	0.56
4	0.17	0.25	0.39	0.50	0.75	1.10
5	0.34	0.47	0.71	0.94	1.37	2.04
6	0.49	0.77	1.23	1.60	2.39	—
7	0.83	1.37	2.14	3.06	—	—

の定量的関係については、今後の研究にまつものが多いようである。

12) 扇形水槽による実験結果 波の入射角を種々に変化できる扇形水槽を用い、等深線が汀線に平行な直線海岸に離岸堤を設けた場合について、沿岸流速分布と海岸変形との関係を調べる目的で、一連の実験を行った。沿岸流速の測定には、プロベラ式流速計を用い電氣的に自記させることにしたが、その検定曲線および自記装置や水槽などは、沿岸漂砂量の推定に関する著者の論文中に詳述してあるから、ここでは省略する。実験用砂の平均粒径は約 0.4mm であつて、篩分け係数(Sorting coefficient) 1.26 のほぼ均一な粒分布をもつてゐる。

実験は、波起し機と汀線のなす角 α を $30^\circ, 40^\circ$ とした二つの場合について、波形勾配と異にする種々の波と作用させて行った。また、離岸堤を汀線に平行において斜めに波を受ける場合と、離岸堤を入射波の峰と平行においてそれにほぼ直角に波がある場合とについて実験したが、それぞれの場合の波の特性および離岸堤の設置位置は表-2のとおりである。この表において、 h_1, h_2 は離岸堤が汀線とある角 α をもつて設置された場合の両端における水深、 l_1, l_2 は離岸堤両端から汀線までの距離である。 $\theta = 0$ 、すなわち離岸堤を汀線に平行においた場合は、 $h_1 = h_2, l_1 = l_2$ である。なお、 h_c は砂の移動限界水深で、参考のために入れたものである。

表-2 実験に用いた波の特性と離岸堤の設置位置

波起し機と汀線のなす角 α	沖波高 H_0 (cm)	周期 T (Sec)	沖波長 L_0 (cm)	沖波波形勾配 H_0/L_0	沖波の入射角 α_0	砕波の入射角 α_b	砕波指標 H_0/L_0	離岸堤と汀線のなす角 θ	離岸堤の水深および汀線からの距離と波長との比				砂の移動限界水深と波長の比 h_c/L_0
									h_1/L_0	h_2/L_0	l_1/L_0	l_2/L_0	
30°	8.96	0.88	121.0	0.0741	$30^\circ 24'$	$21^\circ 24'$	0.105	30°	0.0198	0.0702	0.53	1.15	0.16
	8.24	0.92	132.0	0.0624	$30^\circ 52'$	$19^\circ 34'$	0.081	30°	0.0303	0.0575	0.303	1.06	0.13
	7.16	0.96	144.0	0.0496	$31^\circ 12'$	$17^\circ 35'$	0.0496	30°	0.0132	0.0562	0.416	0.765	0.10
	6.22	1.08	175.0	0.0355	$32^\circ 00'$	$16^\circ 01'$	0.048	30°	0.0144	0.0766	0.194	0.656	0.072
	4.37	1.26	243.0	0.0166	$35^\circ 14'$	$13^\circ 22'$	0.027	30°	0.0156	0.0481	0.304	0.596	0.058
	6.12	1.16	210.0	0.0259	$34^\circ 03'$	$15^\circ 22'$	0.041	0	0.0510	0.0510	0.715	0.715	0.062
	7.16	0.96	144.0	0.0496	$31^\circ 12'$	$17^\circ 35'$	0.0496	0	0.0792	0.0792	0.938	0.938	0.10
40°	6.06	1.14	203.0	0.0298	$44^\circ 14'$	$20^\circ 00'$	0.042	0	0.0433	0.0433	0.640	0.640	0.068
	7.16	0.96	144.0	0.0497	$41^\circ 23'$	$23^\circ 29'$	0.068	0	0.0555	0.0555	0.902	0.902	0.10
	7.16	0.96	144.0	0.0497	$41^\circ 23'$	$23^\circ 29'$	0.068	40°	0.0575	0.0818	0.485	1.01	0.10

海岸変形については、波の作用時間 1hr 後の地形を実測することとし、沿岸流速としては、汀線より 20cm 離れた地奥の流速を測った。この実験の結果から (1) の場合と同様に各断面の単位幅 (1cm) 当りの浸食量および堆積量を求め、これを縦軸にとり、距離を横軸にとって図示した一例が図-6 である。この図には沿岸流速の分布も示してあるが、(+) は正常の波の進行方向に生じる沿岸流速、(-) は離岸堤によって回折された結果生じる逆向きの沿岸流速をあらわす。この図からわかるように $\theta = 0$ および $\theta = 40^\circ$ のいずれの場合でも、沿岸流速が右上りとなるところは浸食ないしは浸食の傾向を示し、右下りとなるところは堆積ないしは堆積傾向を示している。しかし、離岸堤と汀線とのなす角 α によってその浸食堆積範囲が大いに变化する。すなわち、 $\theta = 0$ の場合は漂砂の進行方向側の堤端部分に

はあまり堆積せず、その外側がかわって浸食されていくのにかかわらず、他端付近には最大の堆積量を示している。また、入射波の峰と平行に離岸堤を設置した場合には、漂砂の進行方向側の堤端付近に最大の堆積を生じ、他端側はかえって浸食を受け、 $\theta=0$ の場合と逆の傾向を示している。この場合は(1)で述べた宮津海岸の場合と全く同じ浸食堆積傾向であるが、 $h_{1,2}/L_0=0.0575, 0.0818$ であって、 $h_c/L_0=0.10$ より小さいために、漂砂のはけい地帯に設置されているわけであり、半島堤化する傾向は宮津海岸の場合より強くなっている。

以上のように離岸堤と汀線とをなす角を θ による堆積浸食傾向の相違は、構造物による波のエネルギー減殺の程度の差によるものであろうが、実地において構造物を計画する場合には、構造物の機能、すなわち泊地形成か浸食防止のいずれの機能を目的とするかを十分理解して、将来の海岸変形を明確に把握することが必要である。いおれにしても、(1)および(2)の実測、実験で明らかにしたように、沿岸流速の分布と正確に求めることによって、ある程度将来の海岸変形を推定することができるはずである。

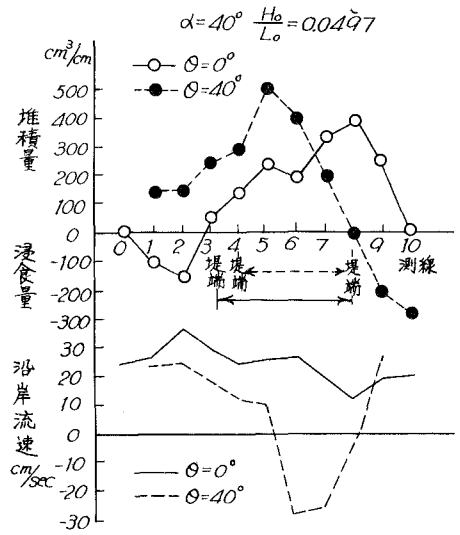


図-6 $\alpha=40^\circ$ の場合における浸食、堆積量と沿岸流速の分布

4. トンボロの形成と発達

前節で述べたように、卓越した漂砂方向をもつ海岸に離岸堤のような構造物を築造すると、その遮蔽水域において汀線が逐次前進し、舌状の海岸線を形成する。これをトンボロ (Tombolo) というが、以下にその形成発達について従来の研究と著者の実験にもとづき若干の考察を加えよう。

トンボロの形成については、すでに M. G. Sauvage de Sainte Marc および M. G. Vincent の研究があり、波の方向によるトンボロの形状変化と発生条件を模型実験で確かめている。その結果、直線海岸に平行に離岸堤や島がある場合に、波の峰が常に海岸に平行に来襲するときは、図-7(a)のように離岸堤のほぼ中央に突出して対称的なトンボロができることが多く、海岸にある角をなして波が入射するときは、図-7(b)のように非対称のトンボロが形成されることがわかった。なお、後者の場合には、トンボロより上手側の浜では堆積し、下手側の浜では浸食をともなうものである。

著者の実験においても、こうした二種類のトンボロが同じ特性をもった波に対して形成されたが、その結果の一

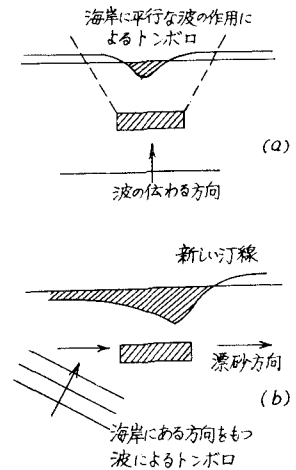


図-7 トンボロの形状

例を示したのが図-8である。この場合、波は汀線に常にある角度(図-8では $\alpha=40^\circ$)をもっており、構造物と波の峰に対して平行または 40° に設置したのであるから、トンボロの形状は汀線に対する波の入射角 α に支配されるのではなく、構造物に対する波の入射角によって大きい影響を受けるものと考えてよい。

Sourage de Sainte Marc は汀線から構造物までの距離 l と沖波波長 L_0 との比がトンボロの発生条件を支配し、一つの波が長時間作用した時は、汀線が前進して l が l_0 になったときにトンボロが発生することを見出し、周期 0.8sec の波で構造物の設置水深が 10cm 、構造物の長さ d と波長 L_0 との比が1である場合、 $l_0/L_0=5/4$ という値をえている。この l/L_0 という無次元数がトンボロの発達に対しても重要な因子と考えられるが、このほかにも多くの因子が関係するであろうことは想像にかたくない。

いま、トンボロの発達割合として、それが突出した個所の元汀線からの距離 l' と沖波波長 L_0 との比をもってあらわすと、これに影響するものとしては、著者の数少ない実験結果からしても、 d/L_0 , H_0/L_0 , l/L_0 , V (沿岸流速), α_0 (沖波の入射角)が考えられる。沿岸流速 V はまた α_0 , H_0/L_0 , T , i (海浜勾配)の函数として計算されるから、^{9),10)} 結局 l'/L_0 はつぎのような函数となるであろう。

$$l'/L_0 = f(d/L_0, l/L_0, H_0/L_0, T, \alpha_0, i) \quad \dots\dots\dots(8)$$

著者の実験結果によると、 H_0/L_0 , α_0 , d/L_0 , i を一定とした場合、 l'/L_0 は l/L_0 が小さいほど大きいことがわかった。しかし、その定量的関係を数少ない実験結果から早急に断定することは困難であって、今後に残された研究課題である。

5. 結 語

著者は一様な直線海岸における離岸堤が沿岸漂砂に及ぼす影響を推定するために、沿岸流速の分布による方法を提唱し、その妥当性を実測および実験によって確かめるとともに、トンボロの形成と発達についても若干の考察をしたが、定量的関係については今後の研究にまかすべきものが多い。

最後にこの研究に終始御指導を賜った石原教授、岩垣助教授、実測および実験に協力していただいた京都府宮津工管所の方々および大学院学生諸君に謝意を表するとともに、文部省試験研究費および京都府土木部の援助によったことを付記する。

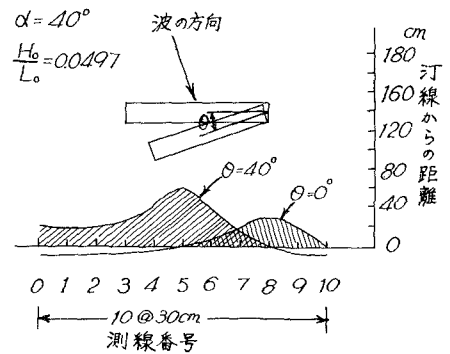


図-8 トンボロの実験結果

参考文献

- 1) 岩垣雄一, 榎木亨: 海岸の平衡勾配と碎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, pp.99~105.
- 2) 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五周年記念論文集, 昭31.11, pp.233~240.
- 3) 富山県海岸対策協議会: 富山湾海岸浸食報告書, 昭27.5, pp.54~104.
- 4) 永井庄七郎: 海岸防砂堤について(1), 海岸工学研究発表会論文集, 昭29.11, pp.99~104.
- 5) 永井庄七郎: 海岸防砂堤に関する研究(2), 海岸工学講演会講演集, 昭30.11, pp.107~116.
- 6) 嶋野貞三, 本間仁, 堀川清司: 突堤の及ぼす影響について, 海岸工学講演会講演集, 昭30.11, pp.49~56.
- 7) 嶋野貞三, 本間仁, 堀川清司: 海岸水制の効果に関する実験, 海岸工学講演会講演集, 昭31.11, pp.195~202.
- 8) Per Brunn: Measures Against Erosion at Groins and Jetties, Proc. of 3rd Conference on Coastal Engg., 1952, pp.137-164.
- 9) Inman, D.L. and Quinn, W.H.: Currents in the Surf Zone, Proc. of 2nd Conference on Coastal Engg., 1951, pp.24-36.
- 10) Putnam, J.A. Munk, W.H. and Traylor, M.A.: The Prediction of Long-shore Currents, Trans Amer. Geophys. Union, Vol. 30, No 3, 1949, pp.337-345.
- 11) Wiegell, R.L.: Gravity Waves Table of Functions, Council on Wave Research, Feb., 1954.
- 12) Dunham, J.W.: Refraction and Diffractions Diagrams, Proc. 1st Conference on Coastal Engg., 1950, pp.39-49.
- 13) 田中 清: 防波堤の水理, 土木学会水工学論文集, 昭28.3, pp.99~119.
- 14) Putnam, J.A. and Arthur, R.S.: Diffraction of Water Waves by Breaker, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 29, 1948, pp.481-490.
- 15) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 村上正: 明石海峡北岸の浸食調査について, 海岸工学講演会論文集, 昭31.11, pp.185~194.
- 16) 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.