

養浜の波高減衰効果に関する実験的研究

石原藤次郎・岩垣雄一・榎木 亨

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF NOURISHED BEACHES ON DAMPING OF WAVE HEIGHT

by Dr. Eng. Tojiro ISHIHARA, Dr. Eng. Yuichi IWAGAKI
and Dr. Eng. Toru SAWARAGI

Synopsis

So far, coastal structures such as seawalls and groins are used for shore protection. However, these works are passive and unsatisfactory to prevent beaches from erosion due to wave action, because the protective region by such structures is relatively narrow, and besides the works always transfer beach erosion to adjacent areas, more or less. Recently therefore the nourishment of beaches is often adopted as one of beach protection works.

In this paper, the effect of nourished beaches on damping of wave height for the cases of wave steepnesses 0.01 and 0.02 is evaluated from the experiments with respect to the relations between the volume of nourishing sand, the damping rate of wave height and the height of a submerged breakwater. In addition, the movement of shorelines after nourishment to the equilibrium state is treated.

1. 緒 言

海岸の防禦工法としては、通常、護岸及びそれに付加する捨石工、さらに防砂堤などの構造物による局地的な防禦法が採用される。しかしながら、これらの工法は海岸浸食防止法としては極めて消極的な対策と考えられ、多かれ少なかれ隣接地に浸食地点を転移させるのが常である。このような理由によつて、近年、海岸線全体の保全や防護を目的とした養浜工法が脚光をあび、諸外国とともにわが国においてもその方面の研究が進められている。養浜工とは、海岸の浸食防止と波浪の直接的な被害を減少させるため、人工的に海浜に土砂を供給し、自然の外力を利用して海浜を造成し防護するとともに、その海浜を積極的に利用するための工法であつて、とくに米国の各海岸においては、すでに数多くの実施例をみている¹⁾。

これらの養浜工は、(1) 養浜工法 (3) 養浜計画 (3) 養浜効果の三要素に分けて考えられる。

この養浜効果は、水理学的効果である波高減衰効果と経済的效果の二つを含んでいる。養浜の水理学的な効果は、一般に養浜材料の粒度、養浜勾配、養浜の天端高さ、長さ、巾、養浜土砂量などによつて影響をうけるものと考えられるが、本論文においては、養浜の波高減衰効果についての実験にもとづいて、養浜土砂量と波高減衰との関係及び養浜の天端高さの波高減衰に及ぼす影響について考察を進め、さらに養浜後の安定勾配についても明らかにしようとするものである。

なお、著者らの研究の場合、養浜土砂の流亡を防止するために、潜堤を附随的に設置し、潜堤背後を養浜して、波高減衰に及ぼす養浜の効果を明らかにしようとするものであるが、本論文ではこの潜堤の設置位置を沖波波高の1.5倍の水深の場所に定めた。波高減衰に及ぼす潜堤の位置の影響及び減衰の機構に関する力学的な考察については次の機会に報告したい。

2. 実験方法

実験には、大小二種類の水槽を用い、全く同じ種類の実験を行なった。これは波高減衰効果に及ぼす縮尺比の影響を調べるためのもので、Table 1 に示すように小水槽における波は大水槽の波の 1/15 のものである。大きい方の実験水槽は長さ 70 m、巾 1.0 m、水深 1.0 m のニューマティック型の波起機を有し、小水槽は長さ 10 m、巾 0.3 m、水深 0.25 m でプランジャー型の波起機を有している。

これらの水路に中央粒径 $d_{50}=0.36$ mm の均一な網野海岸の砂を 1/10 勾配に敷き、初期海浜勾配とした。この初期勾配に Table 1 に示す実験波を作用せしめ、平衡勾配を形づくらせたのち、 $h_1/H_0=1.5$ の位置（ここで、 h_1 は潜堤設置位置における水深、 H_0 は沖波の波高）に潜堤を設置し背後を養浜して、潜堤背後の波高変化を電気式ポイントゲージにより精測した。

Table 1 Wave characteristics for experiment

Wave tank	H_0 (cm)	T (sec)	H_0/L_0	h_2/h_1	
Large tank	15	3.11	0.01	0.5	0.2
		2.20	0.02	0.5	0.2
	20	3.58	0.01	0.5	0.2
		2.54	0.02	0.5	0.2
	25	4.00	0.01	0.5	0.2
		2.83	0.02	0.5	0.2
Small tank	1.0	0.74	0.01	0.5	0.2
		0.53	0.02	0.5	0.2
	1.31	0.86	0.01	0.5	0.2
		0.61	0.02	0.5	0.2

これらの実験では、波が潜堤の個所で砕波するので、この砕波の運動機構が十分解明されていない現在、この養浜の効果を考察するには次元解析に基づくほかはない。

いまこの水槽の幾何学的要素、波浪要素、流体の要素、底質の要素を選びだし、底質の特性を一定とし、流体の粘性効果、摩擦の影響²⁾を無視すると、波高変化は次式であらわされる。

$$\frac{H}{H_0} = \varphi(\xi/h_1, h_2/h_1, H_0/L_0, d/H_0) \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 ξ は潜堤から岸側への距離、 h_1 は潜堤前面の水深、 h_2 は潜堤天端の水深、 H_0 および L_0 はそれぞれ沖波の波高および波長、 H は ξ の地点における波高、 d は養浜砂の粒径を示す。

以下、(1)式に示す諸量の波高変化に及ぼす影響を明らかにしていくことにする。

3. 潜堤による波高減衰と反射率について

さきにも述べたように、養浜土砂の流亡を防止する目的で潜堤が建設されるが、養浜による波高減衰を考察するにさきだつて、この潜堤のみの波高減衰効果を明らかにすることが必要であろう。この潜堤による波高減衰効果に関しては、従来の諸研究^{3),4),5)}により、現象そのものはかなり明らかにされている。

ここでは、著者らの実験結果にもとづいて、潜堤の波高減衰効果をその反射率と関連づけて論じていくことにしたい。

一般に、潜堤前面に到達した入射波のエネルギーはつぎの二つにわけられる。すなわち、(1)潜堤によつて反射するもの、(2)潜堤を越えて、さらに前方へ伝達されるものである。したがつて、潜堤による波の反射率が波高減衰と極めて重要な関係をもつであろうことは容易に推定されるので、まず波の反射率を調べてみよう。一般に波の反射率は、越波を許さない場合についてのみ論議され^{6),7)}、潜堤による反射について論じたものは極めて少ない。

ここでは砕波点付近における Healy⁶⁾ 及び岸博士⁸⁾らの部分重複波理論を用い、潜堤より $L_m/4$ の距離はなれた地点の最大波高と最小波高を計測して反射率を求めた。ここに L_m は最大と最小の波高があらわれる地点における波長の平均である。

Fig. 1 は、以上の方法によつて求めた反射率 H_r/H (ここに H_r は反射波高、 H は入射波高) を縦軸にとり、横軸に潜堤天端の水深の無次元量 h_2/h_1 をとつて、沖波波高別に波形勾配をパラメーターとして示したものである。この図から、つぎのことがいえる。

(1) 同じ h_2/h_1 の天端深さをもつ潜堤による反射率は、 H_0/L_0 によつて極めて顕著な影響をうけ、 $H_0/L_0=0.01$ の波は $H_0/L_0=0.02$ の波に比較して大きな反射率をもつ。この事実は Healy の一定勾配 (1/15 勾配) における実験結果とよく一致しており、本実験においては $H_0/L_0=0.01$ と 0.02 の実験資料しかないが、Healy の実験から推定すれば、 H_0/L_0 が増加しても反射率は $H_0/L_0=0.02$ の場合の値よりあまり増大しないであろう。

この波形勾配による反射率の変化については、Healy はただ単に碎波の性質がことなるためと説明しているが、著者らの場合は $H_0/L_0=0.01$ の波では、 0.02 以上の波に比較して潜堤が碎波点近くに設置されることになる。

すなわち、Iversen⁹⁾ の H_0/L_0 と h_b/H_0 (ここに、 h_b は碎波水深) の関係曲線によると、 H_0/L_0 が 0.02 より小さくなると h_b/H_0 の値は急激に大きくなることが知られており、したがって前者の波が後者の波に比較して孤立波の性質が著しくなり、波による底部近くの水速が大きくなるため、反射率が大きくなるものと考えられる。

本実験のように H_0 が一定の場合には、波形勾配 0.01 の波の碎波水深は、波形勾配 0.02 の波の碎波水深より大きくなり、潜堤の設置水深に近接する。

(2) 同じ H_0/L_0 の波において、反射率の増加割合は、 h_2/h_1 が 0.5 まではあまり大きくないが、潜堤の高さがそれより高くなると、反射率は急激に増加する。この事実から、もし、潜堤による波高減衰が潜堤の反射率の大小に左右されるものとする、潜堤の高さが水深の $1/2$ 以下のものであれば、潜堤による波高減衰効果はほとんどなく、波高の減衰を目的とした潜堤を建設するためには、少なくとも潜堤の高さが水深の $8/10$ 以上のものでなければならないことがわかる。

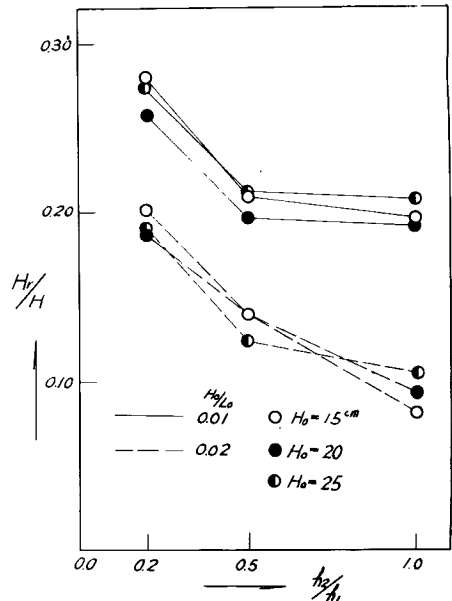


Fig. 1 Plots of reflection coefficient H_r/H against h_2/h_1

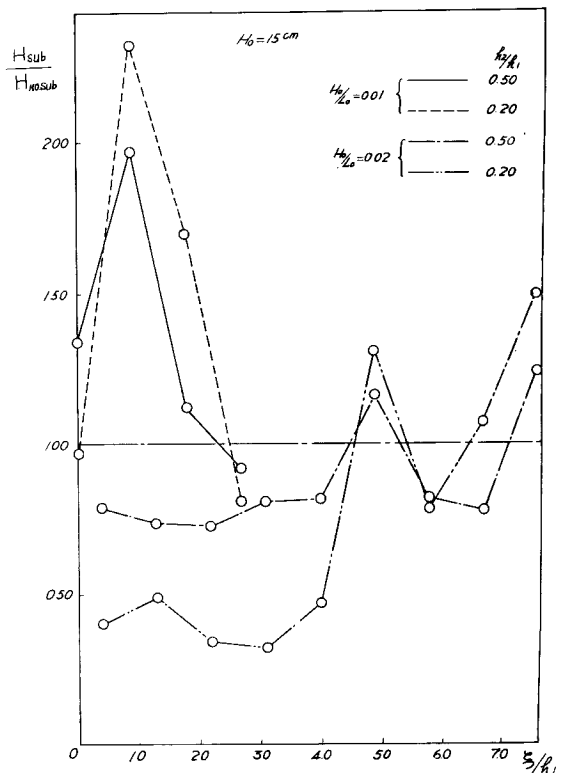


Fig. 2 (a)

つぎに潜堤による波高減衰効果を Fig. 2 及び Fig. 3 によつて考察してみよう。Fig. 2 は縦軸に同一地点の有堤時の波高と無堤時の波高との比 $H_{sub.}/H_{no\ sub.}$ をとり、横軸に x/h_1 をとつてあらわしたものである。この図から、潜堤による波高減衰に及ぼす波形勾配及び h_2/h_1 の影響を検討すれば、つぎのような事実を明らかにすることができる。

(a) $H_0/L_0=0.01$ の波の場合、 $H_0=20\text{cm}$ の場合を除いて、波が潜堤を通過した直後から波高が増大し、ある距離に達すると急激に減少する特性をもっており、無堤時のときよりかえつて波高が大きくなる。

(b) $H_0/L_0=0.02$ の波の場合には波高減衰効果がかなり見られる。ただ潜堤を通過してある距離に達したとき無堤時の波高より大きくなるときがあるが、その程度は $H_0/L_0=0.01$ の場合よりかなり小さい。

(c) 同じ H_0/L_0 の値をもつ波では、一般的にいって h_2/h_1 の値が小さいほど、すなわち潜堤の高さが高くなり反射率が增大すると、波高減衰は大きくなる。

(c) の事実は、 h_2/h_1 の減少にともなう反射率の増加（有堤時の反射率と無堤時の反射率の差）をパラメーターにとつて、 $H_0/L_0=0.02$ の場合の波高減衰をあらわした Fig. 3 によつても明らかにすることができる。

以上の実験事実は、従来の波高減衰が潜堤の反射率の大小のみによつて規定されるという考え方を改めるべきことを示唆するものであろう。すなわち、潜堤による波高減衰は、反射率と深い関係にあることはもちろんであるが、反射率のみに左右されるものでなく、入射波の特性にも極めて大きく影響されることがわかる。

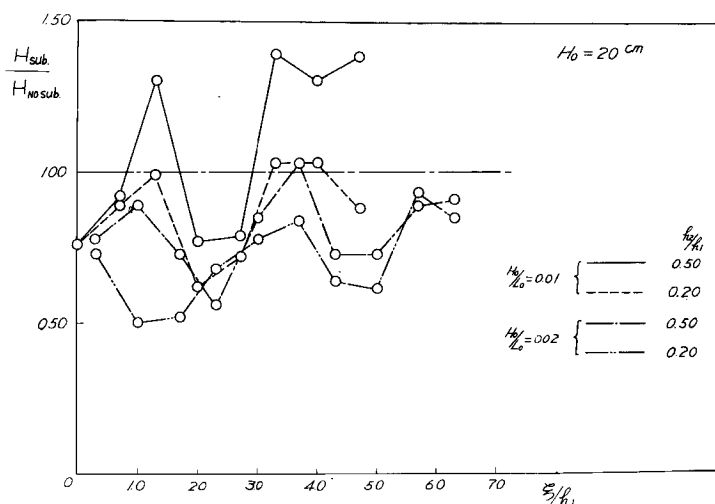


Fig. 2 (b)

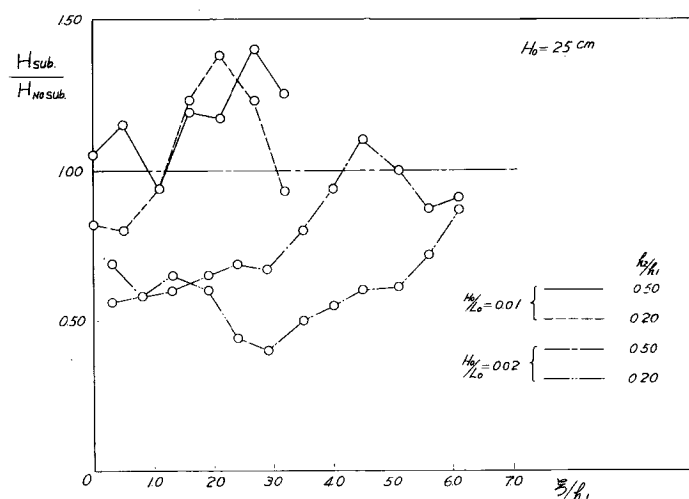


Fig. 2 (c)

Fig. 2 Wave damping effect of submerged breakwater

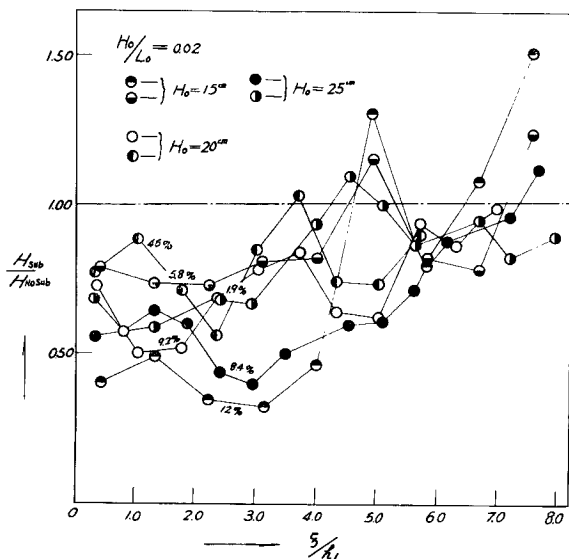


Fig. 3 Relationship between the damping ratio of wave height and the rate of reflection

と入射波高の比が大きくなり、前浜勾配が急となつて、 h_2/h_1 が減少、すなわち潜堤の高さが増すにしたがつて、波高比の極大値が増加するという一般の予想とはことなつた結果を示すものと思われる。

このことは、潜堤によつてのみ背後地を防禦しようとする場合、潜堤の設置位置選定にあつて、十分考慮されなければならない事柄である。

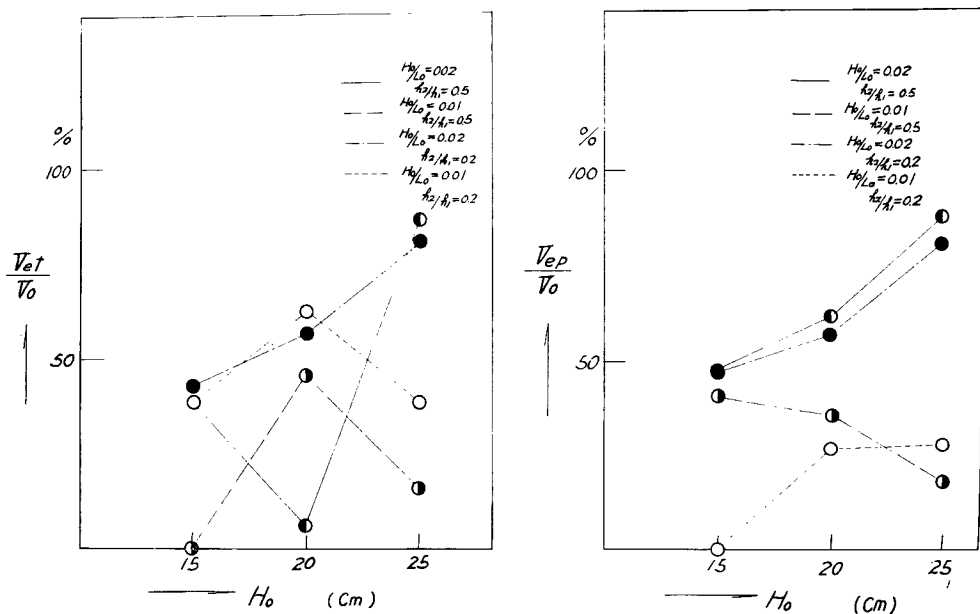


Fig. 4 Changes in effective volume of nourished sand with h_2/h_1 , H_0/L_0 and H_0

さらに、波高比の場所的な変化状態をみると、前述のように波形勾配および潜堤の高さにかかわりなく、波が潜堤を通過直後に波高が減少するか、あるいは波高が変化しないままある距離を経て後に波高が増大するのがみられる。この波高増大のあらわれる位置は、入射波が同じ場合には、ほぼ同一地点であつて、潜堤からの距離は $0.3L \sim 0.5L$ という一定の値をとる。この波高比の極大は、引き波と入射波との重複によつて生じるのではないかと推定される。したがつて、海浜の地形が変化していくにしたがつて、ある程度位置のずれを生じるが、同一の波に対しては同じ個所にあらわれることになる。またこの重複は、汀線付近の浜勾配による反射に左右されると考えられるから、 h_2/h_1 の値が小さくなつて汀線への入射波高が小さくなると、底質粒径

4. 養浜の波高減衰効果

養浜による波高減衰を生ぜしめる要素として、養浜砂による水深の減少と、養浜砂の移動にともなう摩擦の効果の二つが考えられるが、これらの要素について別々に解析を進めていくことは極めてむずかしい問題であり、碎波の機構が解析されていない現状では、それらの力学的な解明は望むべくもない。

そこでここでは養浜土砂量の算定についても非常に重要な問題となる養浜土砂の残留割合から波高の減衰度を考察していくこととする。

(1) 養浜土砂の残留割合について

2.でもふれたように、実験では無堤時の平衡勾配をもつ海岸地形に潜堤を設置し、その背後を潜堤の天端まで水平に養浜して初期条件を与えたが、波の作用後一部の土砂が潜堤より沖側に流出し、さらにまた残留した土砂も岸に打上げられて平衡状態に達する。この残留土砂が波高減衰に有効な作用を及ぼすものと考えられるので、これをここでは養浜有効砂量と呼ぶこととする。

Fig. 4 はこの養浜有効砂量 (V_e) と初期養浜砂量 (V_0) との比がそれぞれの波高に対して、 H_0/L_0 及び h_2/h_1 の値によつてどのような変化をするかを示したものであつて、**Fig. 4 (a)** は潜堤背後全域に残留した養浜有効砂量 V_{et} と V_0 の比と H_0/L_0 , h_2/h_1 の関係を示したものであり、**Fig. 4 (b)** は潜堤から汀線までの、水深の減少として波高減衰に有効に働いていると考えられる養浜有効砂量 V_{eb} と V_0 との比の変化をあらわしたものである。この **Fig. 4** から養浜有効砂量に及ぼす H_0/L_0 及び h_2/h_1 の影響として、つぎのように要約することができる。

潜堤背後の全域にわたつて残留した養浜土砂量と初期養浜土砂量の比 V_{et}/V_0 は、 H_0/L_0 による明瞭な相違は認められないが、 h_2/h_1 が小さくなるにしたがつて大きくなり、養浜有効砂量は増加することがわかる。

また潜堤より汀線までの残留土砂量と初期養浜土砂量との比 V_{eb}/V_0 は、 H_0/L_0 の影響が明瞭にあらわれ、 $H_0/L_0=0.02$ の場合は $H_0/L_0=0.01$ の場合に比べて大きな残留の割合を示している。

この結果を用いて、つぎに養浜による波高減衰効果に及ぼす H_0/L_0 及び h_2/h_1 の影響

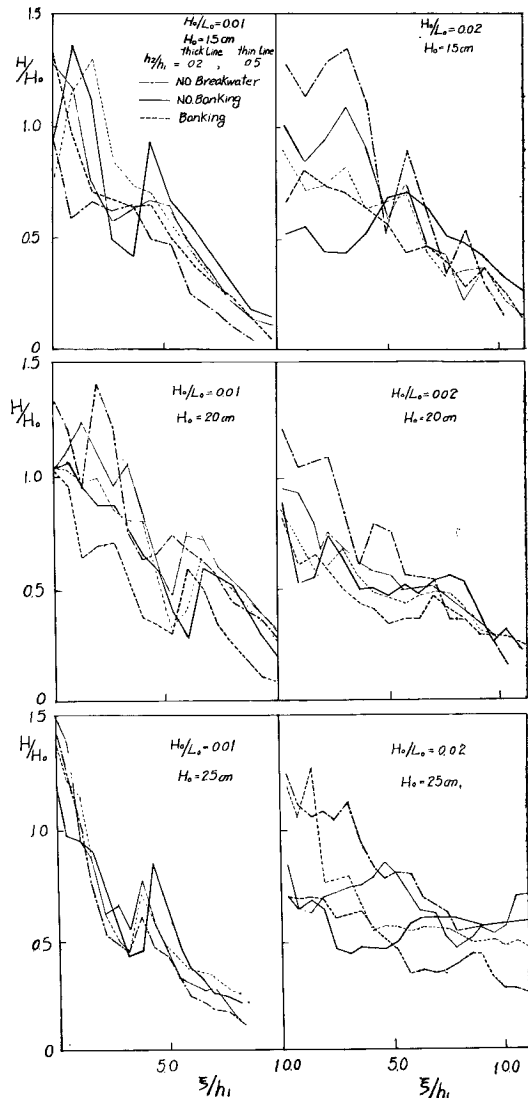


Fig. 5 Changes in wave heights before and after banking

を明らかにしていくこととする。

(2) 波高減衰効果

Fig. 5 は自然状態の海浜の波高変化、潜堤のみの場合の波高変化、および養浜後の波高変化を沖波の波高の比で示した図であつて、養浜後は無堤時と比べて著しい波高減衰を示していることがわかる。

しかしながら、この波高減衰にはさきに述べた潜堤による波高減衰も含含まれているので、養浜のみによる波高減衰効果を明らかにしようとしたのが **Fig. 6** であつて、**Fig. 5** の No banking (潜堤のみで背後に養浜を行なっていない場合) の状態と Banking (養浜を行なつた場合) の状態との同一地点での波高の比の変化を示したものである。

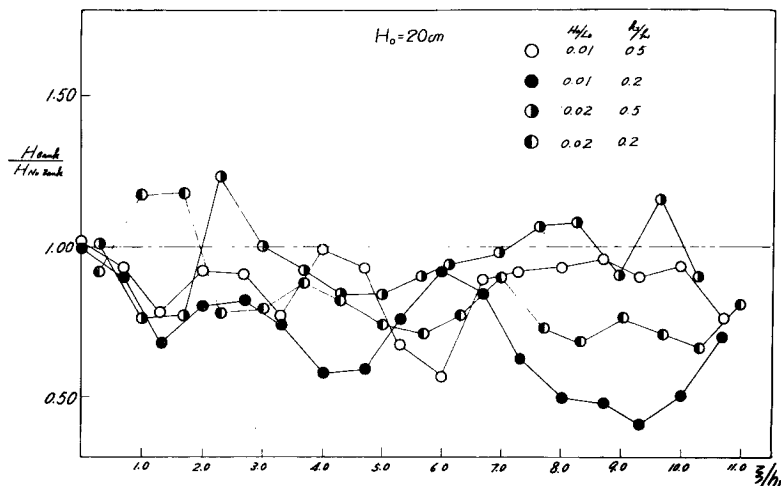


Fig. 6 Wave damping effect of banking

この図によると、 $h_2/h_1=0.2$ の方が $h_2/h_1=0.5$ よりも効果は大きく、 H_0/L_0 の影響はあまり明らかでない。この H_0/L_0 の影響があらわれないことは、潜堤のみによる波高減衰効果と異なる点である。

(3) 波高減衰に及ぼす養浜砂の粒径の影響

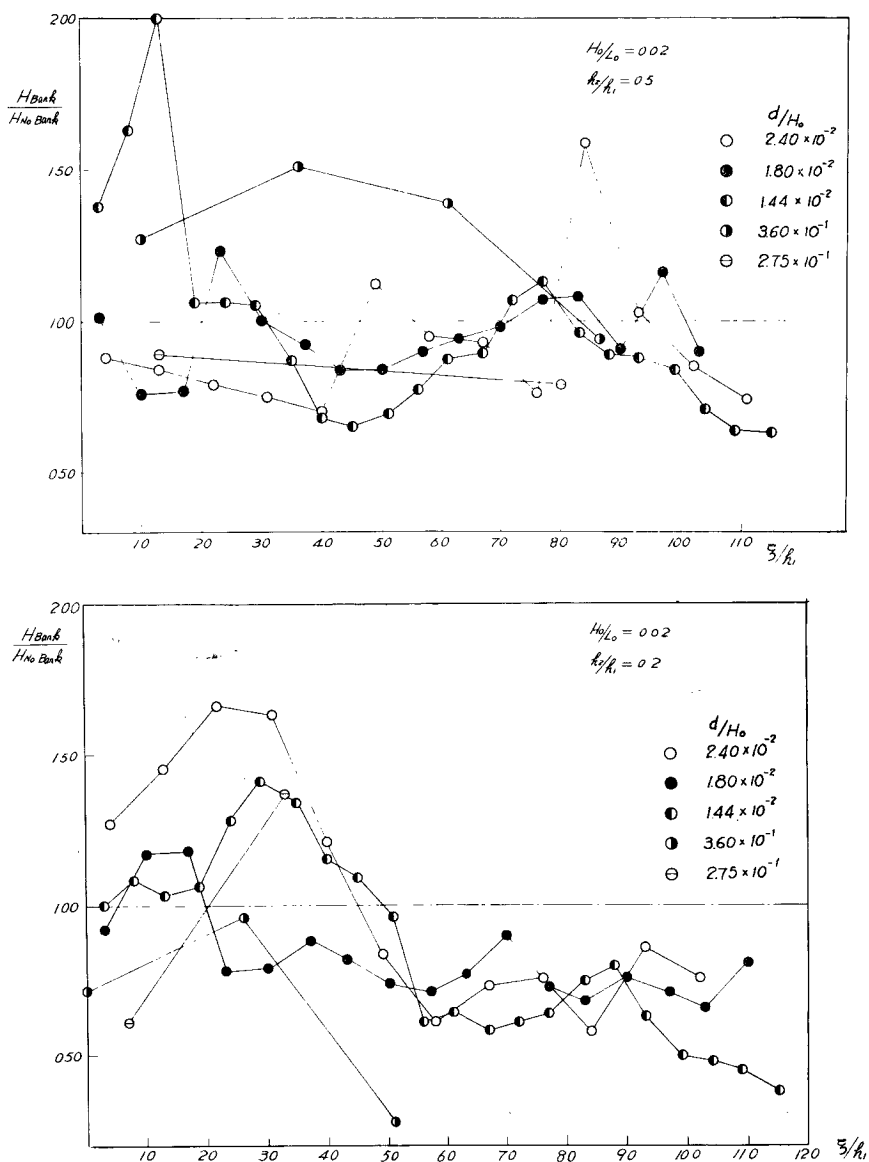
さきにも述べたように、波高減衰の原因の一つとして、底部の摩擦損失が考えられるので、Scale effect として養浜砂の粒径、あるいは養浜砂の粒径と入射波高との比 d/H_0 と波高減衰との関係を調べる必要がある。

著者らはこのために大小二つの水路を用いて、縮尺を異にした実験を試みた。

Fig. 7 は H_0/L_0 および h_2/h_1 を一定にして、波高減衰に及ぼす d/H_0 の影響をしらべたものである。この図からは d/H_0 の大小による波高減衰効果についての明らかな傾向は認められない。これは **Fig. 4** からわかるように、 d を一定として H_0 を変えた場合、残留養浜砂量に変化し、この残留養浜砂量の大小が大きく波高変化に影響することから、摩擦のみによる影響だけを取り出すことができないためである。したがつて、むしろ波高減衰に大きな影響を及ぼす残留土砂量と d/H_0 との関係をさらに究明することが必要であろう。

5. 養浜後の地形変化について

養浜の波高減衰効果に、残留土砂量が極めて大きな影響を及ぼすことはすでに述べたが、養浜工法の最終目的である海岸防禦の面からも、この養浜後の地形変化を十分に明らかにしておく必要があろう。

Fig. 7 Influence of d/H_0 on the wave damping

養浜の海岸防禦工法の効果を示す一つの指標として汀線の移動量があげられるが、最初の汀線の位置（無堤時の平衡勾配における汀線の位置）を基準としてこれを 4δ であらわし、前進の場合を正、後退の場合を負として無次元量であらわしたのが Fig. 8 である。

これによると、 $H_0/L_0=0.01$ で $h_2/h_1=0.2$ の場合を除いて潜堤を設置すると、沿岸方向の漂砂のない場合は、汀線は後退をしている。これは平行堤設置による海岸防禦工法の効果に対して興味ある問題を提示するもので、波高減殺を目的とした潜堤構造物を築造しても、それがいつも海岸浸食防止に対して有効に作用するとは限らないことを示唆している。

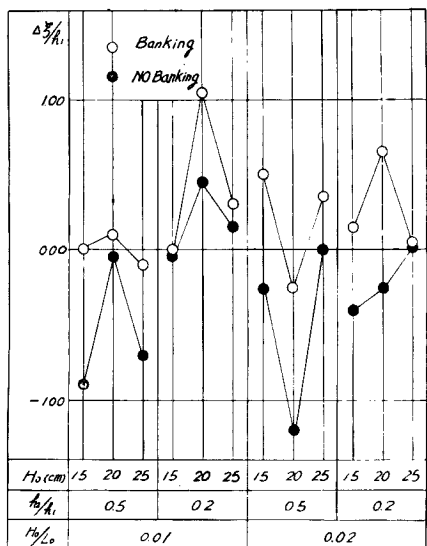


Fig. 8 Movement of the shoreline due to submerged breakwater and banking

しかし、図からわかるように、潜堤と養浜工法とを併用することによつて、逆に汀線を前進させることができるわけで、この面からも養浜工法の別の効果が見出される。

つぎにこの汀線の移動量に及ぼす d/H_0 の影響を示したのが Fig. 9 であつて、養浜後の汀線の前進距離 Δs の無次元量 $\Delta s/h_1$ を縦軸に、 d/H_0 を横軸にとつてあらわしてある。なお $d/H_0 \geq 2.75 \times 10^{-1}$ の場合の値は小水槽による実験値である。

実験値が少ないので、その傾向を論じることは無理かもしれないが、この図から、汀線の前進量は H_0/L_0 を一定とすれば d/H_0 の増加にしたがつて急激に大きくなることがわかる。

6. 結 語

以上、著者らは養浜の波高減衰効果について論じてきたが、潜堤によつて碎波を生ぜしめ、砂の移動とともにその後の波高変化を取り扱うので、極めて現象が複雑でその力学的な解析を行なうことができず、単に実験結果

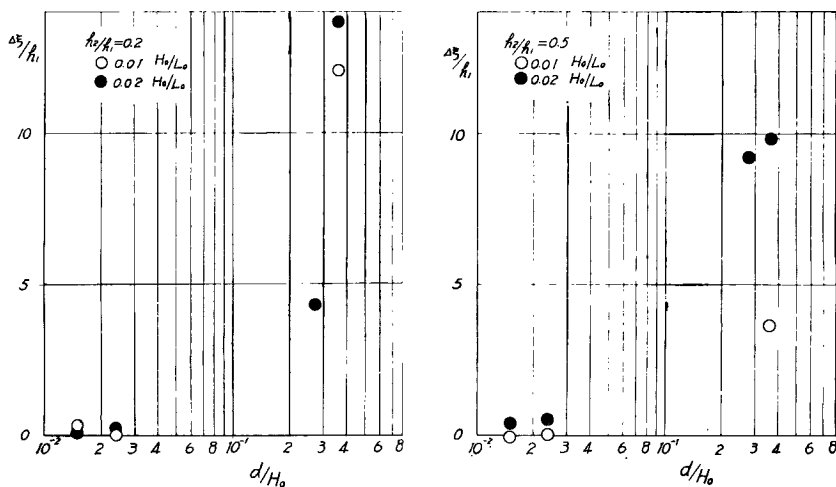


Fig. 9 Influence of d/H_0 on the movement of shoreline after banking

から今後研究すべき問題点を列挙する程度にとどまつた。つぎにその主な問題点を挙げれば、

- (1) 碎波後の波高減衰に及ぼす底部摩擦の影響、
- (2) 養浜有効砂量に及ぼす d/H_0 の効果、
- (3) 潜堤の設置位置の変化にともなう関係諸量の変化、などである。

今後以上の各項目について研究を進め、波高減衰に及ぼす関係諸量の効果を個々に解析して、その機構の解明に努めたい。

最後に本実験に協力していただいた仁張隆次，寺谷卓三，矢野洋一郎の三君に感謝するとともに，本研究が文部省科学研究費による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Caldwell, J.M. : フロリダ州ウォース湖の南湖口における砂のバイパス工法，海岸工学Ⅰ，丸善，pp. 264-270 ; Hall, J. V. Jr. : 人工的に養浜し造成された海浜，海岸工学Ⅱ，丸善，pp. 585-597，など
- 2) Putnam, J.A. and Johnson, J.W. : The Dissipation of Wave Energy by Bottom Friction, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 30, No. 1, 1949, pp. 67-74.
- 3) Johnson, J.W., Fuchs, R.A. and Morison, J.R. : The Damping Action of Submerged Breakwater, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 32, 1951, pp. 704-718.
- 4) Morison, J.R. : Model Study of Wave Action on Underwater Barriers, Inst. Eng. Res., Univ. of Calif., Berkeley, Report H.E.-116-304, 1949.
- 5) 石原藤次郎，榎木亨：潜堤の効果について，京大防災研究所年報，第2報，昭33，pp. 70-82.
- 6) Healy, J.J. : Wave Damping Effect of Beaches, Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, 1953, pp. 213-220.
- 7) 石原藤次郎，岩垣雄一，鈴木雄太：海岸堤防の設計，特に有効高について，海岸工学講演会講演集，昭30. 11，pp. 50-70.
- 8) 岸 力：海岸の波浪について，海岸工学講演会講演集，昭30. 11，pp. 1-12.
- 9) Iversen, H.W. : Studies of Wave Transformation in Shoaling Water, Including Breaking, National Bureau of Standards, Symposium on Gravity Waves, 1951.