

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 10 NO. 2 June 1971

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告は第7巻第1号より年4回定期的に刊行する。

報告の入手を希望する方は論文番号を明記して港湾技術研究所長に申し込んで下さい。

The Report of the Port and Harbour Research Institute is published quarterly, either in Japanese or in occidental languages. The title and synopsis are given both in Japanese and in occidental languages.

The copies of the Report are distributed to the agencies interested on the basis of mutual exchange of technical publication.

Inquiries relating to the Report should be addressed to the director of the Institute specifying the numbers of papers in concern.

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第 10 卷 第 2 号 (Vol. 10, No. 2), 1971年 6 月(June 1971)

目 次 (CONTENTS)

1. 島堤による波の反射および回折に関する研究
.....合田良実, 吉村知司, 伊藤正彦..... 3
(Reflection and Diffraction of Water Waves by an Insular Breakwater
.....Yoshimi GODA, Tomotsuka YOSHIMURA, Masahito Iro)
2. 漂砂の連続的な現地観測について
——海底地形変動に関する一考察——
.....入江 功, 天坂三朗..... 53
(On the Continuous Observation of Littoral Drift in the Field
—A Note on the Variation of the Sea Bottom Level—
.....Isao IRIE, Mitsuaki TENSUKA)
3. 新しい方法による波動の数値計算
——防波堤周辺の波高分布への適用——
.....伊藤喜行, 谷本勝利..... 97
(A New Method of Numerical Analysis of Wave Propagation
—Application to Wave Height Distribution along Breakwater—
Yoshiyuki Iro, Katsutoshi TANIMOTO)
4. 水面波の 2, 3 の性質について
.....浜田徳一..... 121
(On Some Properties of Water Surface Waves
.....Tokuichi HAMADA)
5. 河口侵入波におよぼす河口流の効果
.....金子安雄, 上野信行..... 147
(Experimental Study On Wave Height Damping Effects Due to Opposing Current
.....Yasuo KANEKO, Nobuyuki UENO)
6. 粗粒径土砂混合水による鋼材の摩耗特性について
.....宮崎昭児, 奥出 律, 津村悦夫..... 163
(Abrasion Properties of Steels against Coarse Solid-Water Mixtures
.....Shoji MIYAZAKI, Tadasu OKUDE, Etsuo TSUMURA)

5. 河口侵入波におよぼす河口流の効果

金子安雄*・上野信行**

要 旨

外海から河口に侵入する波は、流れの stopping action による波高増大作用と、乱れにもとづく波高減衰作用の相反する2つの作用によって波高が規成される。本報告はこの波高変化を実験的に検討したものであり、河口流として密度流の二層流型式も考慮し、流量、波の諸元を変化させて実験を行なった結果をまとめたものである。

その結果、(i)流れを翹上する波は流と直面した初期段階で波高を増大させるが、侵入距離を増すに従って減衰する。(ii)波高増大率は流速に比例し、波高減衰率も流速に比例する。(iii)流れを翹上する過程での波高の分布は侵入距離 x に関する指数関数で表示し得る。

* 水工部 主任研究官

** 水工部 高潮津波研究室

Experimental Study On Wave Height Damping Effects Due To Opposing Current

Yasuo KANEKO*
Nobuyuki UENO**

Synopsis

This report described the effect of current with regard to transformation of intrusion waves to river from sea by laboratory test. The laboratory test was to examine damping of wave height of intrusion wave due to opposing current using small water channel. The tests were conducted on fore river discharge and two wave periods, in which the river current was taken up two layer-flow system (1 case).

From the experiment we get the several useful conclusions

- 1, The wave height in channel increases in proportion to the river discharge, but also that the wave height decreases with the increases of the intrusion distance from river mouth.
- 2, It was also shown that the wave damping-modulus of intrusion wave increases with the river discharge.
- 3, The wave height in channel is expressed to make a summary of test as follows

$$H_x/H_m = e^{-\alpha x}$$

where

H_x : Wave height at the distance x from river mouth

H_m : Wave height at the river mouth

α : Wave damping-modulus

x : Distance from river mouth

* Senior Research Engineer, Hydraulics Division

** Member of Storm Surge and Tsunami Laboratory, Hydraulics Division

目 次

要 旨	149
1. ま え が き	149
2. 実験装置および方法	149
2-1 装 置	149
2-2 実験方法	149
3. 実験結果と考察	151
3-1 波高分布	151
3-2 実験の検証	152
3-3 流れによる侵入波の変化	154
3-4 波の進行にともなう波高の減衰	157
4. 結 論	158
5. あとがき	159
参考文献	159

1. まえがき

河口港において河川上流から運搬される土砂によって航路および泊地が埋没する現象は最大の課題であるが、また河口を通過し河道内に侵入する波浪の変化を把握することも、港の計画および改修にとって重要な課題の一つである。外海から流れを遡上して河道内に侵入した波浪は河川流の stopping action を受けるとともに水深、地形の変化による屈折・廻折・反射さらには河道内での副振動などの現象が重複しその波高変化は非常に複雑である。

流れが波におよぼす効果すなわち波が流れのない水域から次第に流速を増大してゆくような流れを遡上してゆく場合、一般に波長は短縮され、波高が増大し、やがて碎波するに至るといわれ、これらの理論的研究には、Yu^① Longuet-Higgins & Stewart^②、浜田^③、岩崎^④その他があり、また榎木^⑤、中村^⑥などの実験的研究がある。これらのすぐれた研究は主に波が流れに直面した直後の性質に関するものであり、波が流れを遡上してゆく過程の変形には岩崎、中村の研究がある。けれども現実の河口侵入波については流れを遡上してゆく過程での場所的な変形が必要とされる場合が多くある。信濃川河口に在る新潟西港では関屋分水(河口から7km上流)によって河川上流からの流送土砂が激減するであろうと考えられるのを契機として、新潟西港の再開発が計画され、その中の問題点の一つとして流量減少に伴う河口侵入波の挙動およびその到達範囲がとりあげられている。この様に流れを遡上する過程での変形ないしは場所的な波の変化を考える場合、河口に侵入する波は、流れの stopping action, 波の radiation stress を通しての Energy の収支によって波高を増大させる作用と、流れを遡上してゆく過程での摩擦効果、流れの乱れなどによる Energy の消散によって波高を減少させる作用^⑦と相い反する2つの作用を考慮しなければならないであろうと思はれる。したがって流れによる波高変化を把握するには、流れの場における波の Energy の消散を見積る必要があるが、本報告はその第一歩として現実に波が流れを遡上する過程でどの様に変化するのか実験的に検討したものであり、実験に採用した水理量は新潟西港を対象として用い、河口流の中に塩水楔の発生している成層密度流の case (1 case) についても実験を行なっている。

2. 実験装置および方法

2.1 装置

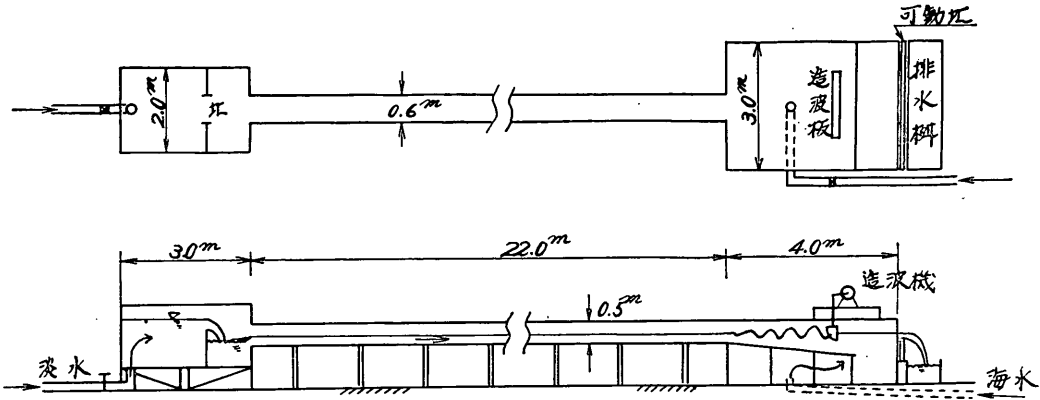
この実験はその期間中水路改修工事のため実験の一部は別途新設された水路を使用して実施した。密度流を含めた実験水路は図-1aに示す長さ22m、幅60cm、深さ50cm 両面ガラス張り木製床面ペイント仕上げの水路であり(本水路を使用して行なった実験を以下実験-Aと呼称する)、も一つの水路は図-1bの如く長さ18m、幅60cm、深さ50cmのコンクリートブロック製内面モルタル仕上げの水路である。(以下実験-Bと呼称する)。それぞれの水路の粗度係数(n)は0.0108, 0.0127 ($H=11\text{cm}$ $Q=3\text{l/s}$)であり、コンクリート水路がやゝ大きい。両水路ともその上流端には流量測定用の矩形堰を取付けた水槽があり、河川流はここで計量され水路へ放流される。水路下流端には外海に相当する水槽があり、実験-Aの水路は水槽の下流側に全幅に亘り水位調節用の可動堰があり、実験-Bの水路は下流端水槽の横側に可動堰6ヶが取付けられている。そして水路を流下した流れはこの可動堰を溢流して排出される。密度流実験用の海水は別に設けられた海水槽に海からポンプで揚水貯溜して実験に必要な密度に調整された後、さらに槽上の高水槽に汲上げられ、水頭を一定に保持した後、 $\phi=3$ 寸のパイプで水路下流端水槽の底部から槽内に導入している。この海水流量は各々のバルブによって調整され、水路内で塩水楔を任意の点で定常に保つことが可能である。

また水路下流端水槽にはそれぞれブランチ型造波装置が取付けられている。造波部水槽側壁内部および水路の上流端には消波装置として厚さ5cmの植物性繊維のマット(商品名ステラシート)を三重に張っている。特に水路の上流端は勾配 $i=1/8$ の斜路とし、河川流はマットの空隙を通過して水路内に流入させている。

2.2 実験方法

実験は水深を一定とした水路に特定の流量をあたえ流速が安定した後、特定の周期、波高を有する波を発生させて水路内に遡上してゆく波形を水路内の定点で測定する方法を採った。そして流量、波の周期、波高をそれぞれ変えて実験を行った。流量を加えた際に水路の水深が増大するが、これについてはあらかじめ水路下流端の可動堰を調節して水深を一定にした後波を発生させた。塩水楔の発生している成層密度流の実験ケースに対しては水路内に塩水楔を発生させ、楔が定常に保持された後波をあたえた。また密度の比 $\epsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$ は河口でもっと

a. 実験-A水路



b. 実験-B水路

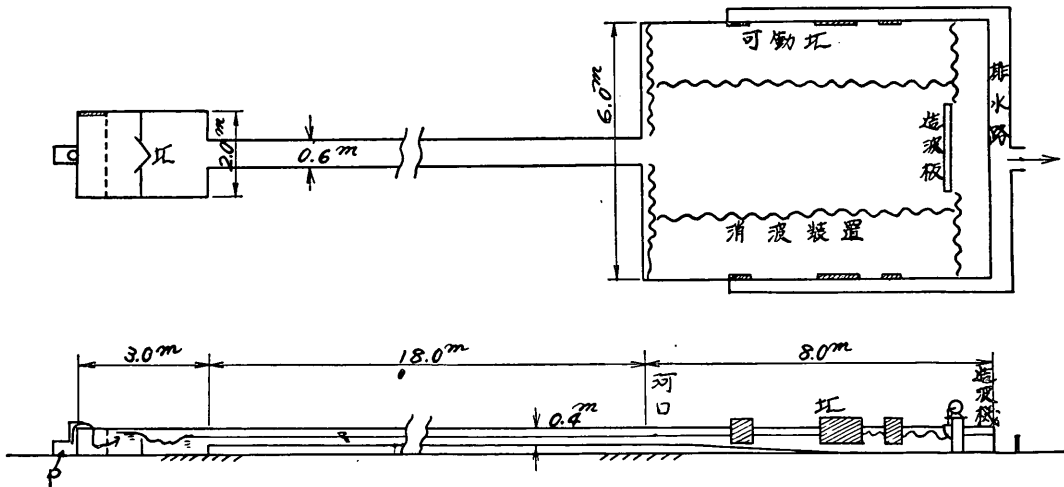


図-1 実験施設

一般的な値と考へられる 0.02 を採用した。したがって海水密度 $\rho_2 = 1.0190 \sim 1.0209$ であった。実験に用いた水理量の諸元は表-1 に示す。

表-1 の中で実験-Aの沖波として e (造波板の偏心量) を以って示したのは、この造波装置の有する水槽の平面積があまりにも狭少であり、且つ側壁での消波が完全でないため発生波が不安定であり H_0 として適当でないと考えられるので H_0 の目安として e を以って示した。さらに流れを加えた際には造波板背後の可動堰から

溢流する流量が造波板の運動周期と同じ様に変動して溢流量が増大しこのため水路の水深が減少するトラブルが生じた。そして造波高に比例して溢流量も増大する傾向がみられたのでその被害を出来るだけ小さくするために H_0 を小さくせざるを得なかった。したがって H_0 としでは約 1.5cm~2.0cm 以下の波である。

水路内での波の測定は河口を基点 (水路と造波部水槽との接合点) とし上流に 0.3m, 1.0m, 2.0m, 5.0m, 8.0m, 10m, 12m, 15m の9ヶ所で波高を計測した。波

河口侵入波におよぼす河口流の効果

表-1 実験の水理量諸元

流量 $Q(l/s)$	周期 $T(sec)$	波高		水深 $h(cm)$	
		$e(cm)$	$H_0(cm)$		
		実験-A	実験-B		
0	0.9	10	12	2, 3	11.0
	1.2	10	15	4, 5	
1.5	0.9	—	12	2, 3	
	1.2	—	15	4, 5	
3.0	0.9	10	12	2, 3	
	1.2	"	15	4, 5	
3.0 + solt wedge	0.9	"	12	2, 3	
	1.2	"	15	4, 5	
5	0.9	"	12	2, 3	
	1.2	"	15	4, 5	

の周期、波長は 8.0m 点で計測している。波高計は電気容量式波高計を用い自動平衡型記録計に記録させた。周期測定はストップワッチを用い造波板の周期および $x=8.0m$ 地点には小型のネオン管式波高計を取付け波高測定終了後ネオン管の点滅周期を測定している。波長の測定は写真および目測によった。流速については流れおよび塩水楔を発生させた後、造波前に代表地点の垂直分布をプロベラ流速計で測定したが、造波中での測定を行っていない。図-2 に塩水楔および流速分布の代表例を示す。

3. 実験結果と考察

3.1 波高分布

図-3 の各図は各水理諸要素の変化に対応する侵入波高の分布を示したものである。図-3 (a) は沖波高の小さな実験-Aの波高分布であるが、流れがある場合は流れがないときより総体的に波高が大きくなる。この傾向

塩水楔

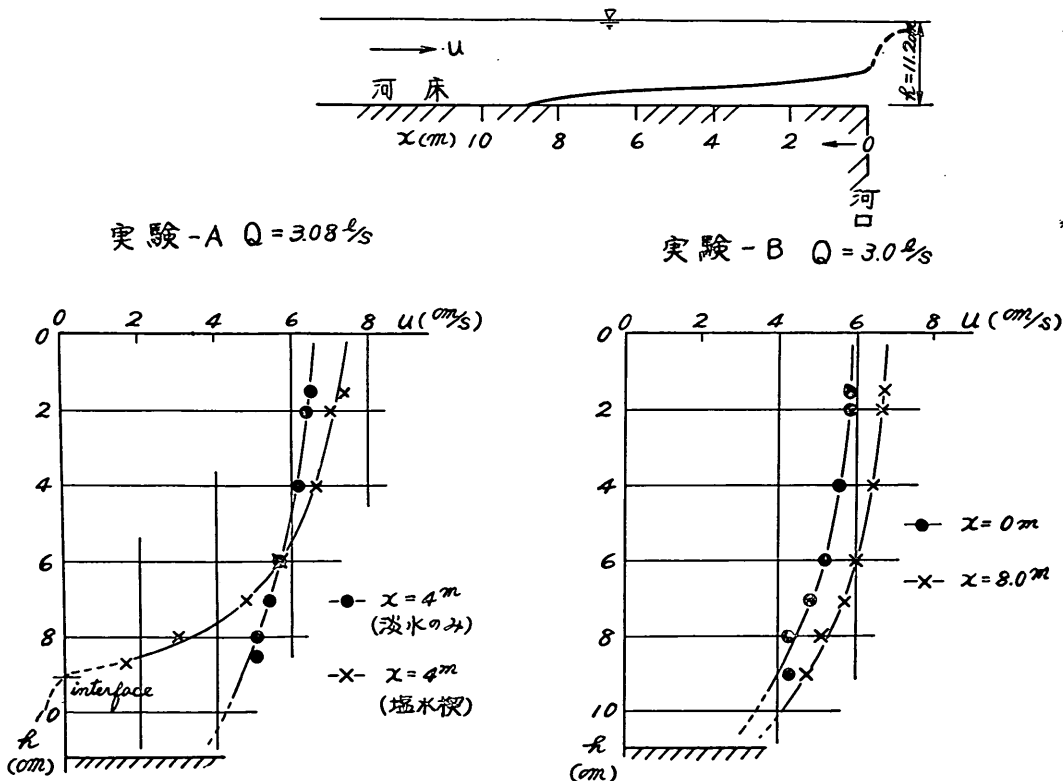


図-2 塩水楔および流速分布

は流量すなわち流速に比例しており、塩水楔の発生しているケースが最も大きい。この場合でも砕波ははまだ生ぜず。水路内では侵入距離に比例して徐々に減衰する。この減衰も流速に比例しており塩水楔発生ケースが減衰傾向が大きい。一方 H_0 の大きな実験一Bの波高分布は図-3 (b~c) に示したが、このケース $T=1.2$ sec,

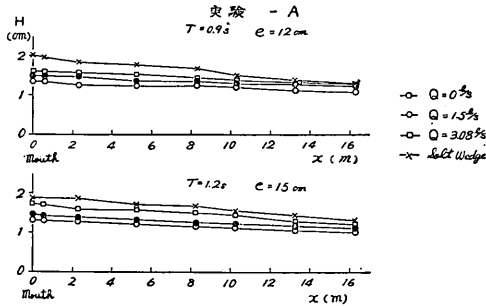


図-3 (a) 波高分布 実験一A

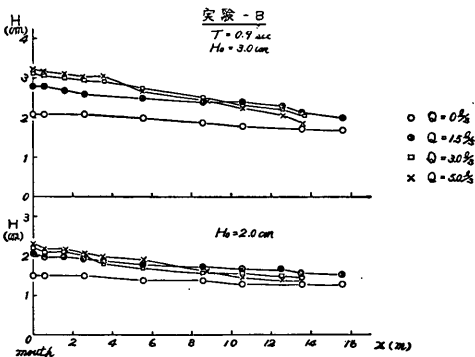


図-3 (b) 波高分布 実験一B

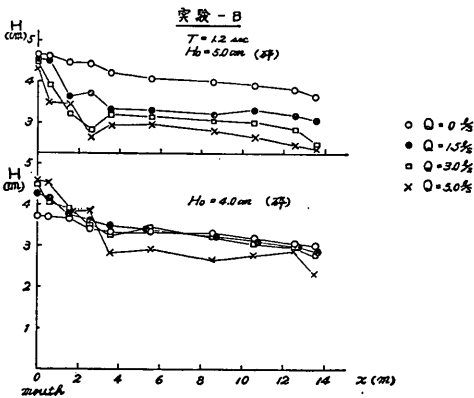


図-3 (c) 波高分布 実験一B

$H_0=4$ cm, 5 cm の場合は流れがないときでも水路内で局部的に崩れ波の発生が見られ、流れを与えた場合は河口端外で完全に砕波となっている。一旦河口外で砕波を生じた波は波高を急激に減少させるが、水路内に入っている区間進行すると再び非砕波時と同形な波形を形成し、さらに進行距離とともに波高を減少してゆく傾向がみられる。しかしこの場合の波の進み方は非砕波時の波の様に波峰線が左右一様に進行するのではなく、左右かなり蛇行しながら進行している。その時流れの平面的分布も色素を流した結果では波峰の動揺と同じく蛇行している。この結果水路内の各測点の波高分布も変動が大きい。

図-3 (b) は $T=0.9$ sec, $H_0=2, 3$ cm の場合であるが波高分布の傾向は図-3 (a) と全く同様である。けれども流れがある場合の河口付近における波高の増大傾向は異なっており、流れが加わると急速に波高増大しその後流速が増加しても波高の増大傾向は大きくない。また流量 $3 \sim 5$ l/s に増大すると水路内に侵入した波は速く減衰しはじめ、侵入距離 $x=14 \sim 15$ m 付近では流量 $Q=0$ のケースの波高とはほぼ同値になる傾向がみられる。図-3 (c) は前述した河口端外で砕波を生じている場合であり、波高分布の変動が大きい。河口外で砕波する地点も流量に対応しており流量が多くなるに従って河口から外海へ移動してゆく。それ故水路内の侵入波高は減少しており、砕波しない流量 $Q=0$ l/s ケースの波高が一番大きい。

侵入波の周期については流れのない場合、流れのある場合のいずれについても砕波が生じない限り全く同一であり、砕波している場合は前述した様に水路内の波が動揺している関係上明瞭な制定は下し難かったが、それでも特に遅れが目立つような傾向は認められなかった。

3.2 実験の検証 ($Q=0$ l/s の場合)

水路内の波高は流れがない場合、流れがある場合でも図-3の各図に示したように、進行距離 x に比例して減衰する傾向を示している。この傾向は進行に伴う水底面および側壁の摩擦による Energy 損失と流れの渦動粘性による波の Energy 損失の両者に基く結果であろうと考えられる。しかしこの様な実験から実際の波の変形を推定する場合現象の相似性を検討しておく必要がある。流れのある場合の波の性質に関する研究は前述した様に Longuet-Higgins, 浜田などの理論的研究があるが波が流れを遡上してゆく過程の変形には言及していないため検討することは出来ないが、流れのない場合は実験を二次元と仮定するならば、浅海における波高減衰に関する実

河口侵入波におよぼす河口流の効果

験として扱え得ると考える。

浅海における海底摩擦による波高減衰に関する研究は Putnam^⑥、Savage^⑦、Eagleson^⑧、岩垣、土屋^⑨その他^⑩ 数多くの研究がある。このうち岩垣、土屋はこの種の水路実験について水底摩擦、側壁摩擦を考慮した波高減衰の式を示している。そこで本実験の検討を岩垣、土屋の理論式によって行ってみる。

それによれば水路内の波の Energy は底面および側壁による摩擦によってのみ消散されるものとし、層流境界層内の Energy 損失による波高減衰は下式で示される。

$$H/H_0 = \exp(-\varepsilon_{b+s} x/L) \quad \dots\dots(1)$$

こゝで

$$\varepsilon_{b+s} : \text{底面および側壁の摩擦にもとづく波高減衰率} \\ = (4\pi^2/\beta L)(1+1/\psi)/(\sinh 2kh + 2kh)$$

$$\psi = (kB/\sinh 2kh) \times \{1 - (1.086 \operatorname{sech} kh + 0.197)\alpha\}$$

$$\alpha = \pi(H/L)/\sinh kh$$

$$\beta = (\pi/\nu T)^{1/2}$$

一方図-3 に示した実験の波高分布を書き換え、縦軸に河口における波高 H_m との比 H/H_m 、横軸に静水時

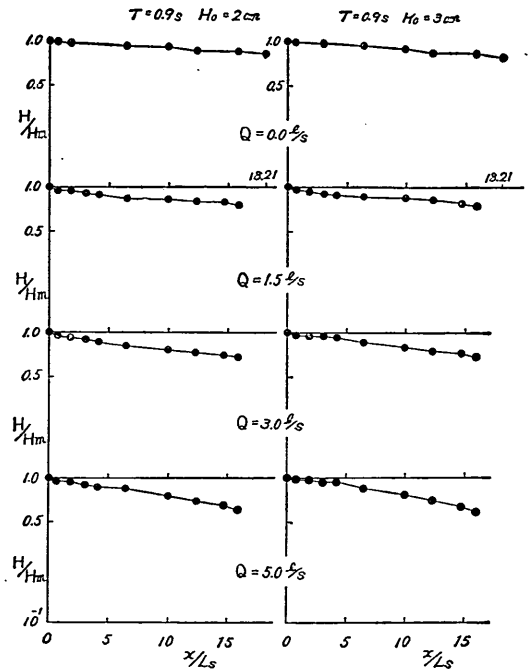


図-4 (b) 波高分布実験-B

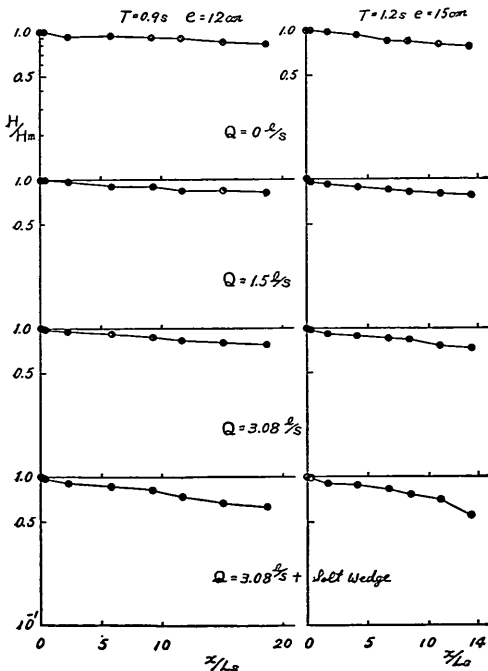


図-4 (a) 波高分布実験-A

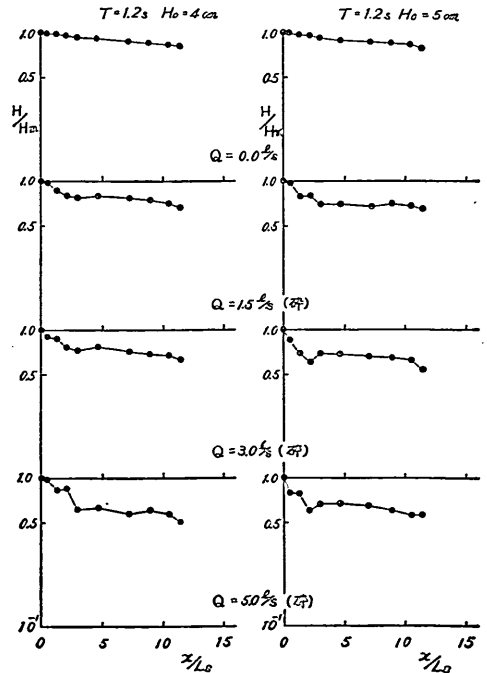


図-4 (c) 波高分布実験-B

(流量 $Q=0^{1/4}$) の波長 L_s と侵入距離 x との比 x/L_s をとって示せば図-4 の各図となる。図のうち侵入波が河口で碎波するケースの波高分布は変化が激しく異常であるが、非碎波のケースの波高はほぼ直線的に減少することが確認され、その関係は (2) 式であらわされる。

$$H = H_m \exp(-\alpha_{(b+w)} x) \quad \dots\dots(2)$$

こゝで $\alpha_{(b+w)}$ は底面および側壁の影響を含んだ波高減衰係数であり、(1) 式の ϵ_{b+w} との関係はつぎのようにあらわされる。

$$\alpha_{(b+w)} L_s = \epsilon_{(b+w)} \quad \dots\dots(3)$$

したがって図-4 の各図の実験値に最適な直線を引くことによって、その勾配から (2) 式にもとずいて波高減衰係数を計算することができるが、直線の引き方によって $\alpha_{(b+w)}$ の値が変化するので、こゝでは (2) 式にもとずき実測値から最小二乗法によって係数を計算した。なお (2) 式および図-4 で沖波高 H_0 を採用せず河口端での波高 H_m を用いた理由は、前述したように満足出来る H_0 が得られなかったためである。

このようにえられた流量 $Q=0^{1/4}$ の場合の実験結果と波高減衰の理論式 (1) と (2) 式の関係から波高減衰係数 $\alpha_{(b+w)}$ を計算して比較した結果を図-5 に示す。図は $\alpha_{(b+w)}$ の値を h/L_s に対して周期ごとにプロットしたもので図中の曲線は (1) 式から求めたものである。

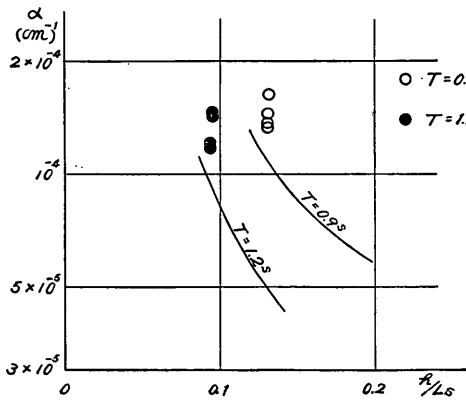


図-5 波高減衰係数の理論値と実験値の比較

図は特定な h/L_s 2 ケースのみであり h/L の大きな範囲に関しては断言出来ないが、実験値のほうが理論値より30~40%程度大きくなっている。この様に実験値のほうが理論値より大きい傾向は岩垣、土屋そのほか^④の実験でも示されており、その理由は明確でないけれども、実

験そのもの、検討は減衰係数のオーダー、理論値との比較結果などから考察して、ほぼ妥当なものと考えられる。

3.3 流れによる侵入波の変化

流れを遡上する波の変化は図-3 に示した如く、河口端外で碎波するケースを除いては、波高は流れのない場合にくらべてある程度増加し、これが侵入距離とともに減衰してゆく状況が見られ、ある一定距離を進行すると流れのない場合とほぼ同じ波高になる傾向を示している。おそらくさらに進行すれば流れのない場合よりも減少するのではなからうかと推察される。一般に流れを遡上する波はその波長、波速を短縮し波高を増大させるといわれており、このことは波が流れに直面した場において摩擦による Energy 損失を省略して Energy 保存則を適用すれば当然波長ないし波速の短縮に見合う程度の波高は増大しなければならないことが判る。そこで流れによる侵入波の変化について実験値と理論値との比較を行なってみる。流れを遡上する波の変形に関する研究は前述したように多くの研究者によって研究されているが、いずれも波が流れに直面した直後の性質に関するものであり、且つ摩擦損失を無視して点などを考えると、今回の実験のような摩擦損失の無視出来ない小さい水路での結果との比較には疑問の余地があるけれども一つの目安として行なってみた。

(1) 波長の変化

流れを遡上する波の変形に関する理論式には流速分布を考慮した浜田^⑤の式を用いた。この式は放物線型流速分布をした流れを、線型化された定常波が遡上する場合の波の性質に関するものであり、一様水深 $h = \text{const}$ の水路に周期 T の波が遡上する場合、流速 u 、波速 c 、水深波長比 h/L の関係は次式で与えられる。

$$\frac{\beta^2 F_2(\beta, S)}{(1-\beta)^2} = \frac{2\pi S^2}{S_0} \cos \theta \coth 2\pi S_0 \quad \dots\dots(4)$$

$$\beta = 1 - \frac{C}{u_{10}} \quad (u_{10} \text{ は表面流速を表す})$$

$$S = h/L, \quad m = 2\pi/L$$

$$F_2 = f(\beta, S, m)$$

こゝで、 u : 流速、 c : 波速、 h : 水深、 L : 波長、 θ : 水路の勾配 (計算では $\cos \theta \rightarrow 1$ とし扱う)。suffixo は $u_1=0$ のときすなわち $\beta \rightarrow \infty$ に対する値とする。

(4) 式を用い実験との比較ためには流速分布が同形でなければならない。実験の流速分布は図-2 に示したように、ほぼ対数則ないしは放物線型であると考へられるので $h=11.0\text{cm}$ 、 $T=0.9, 1.2\text{sec}$ の場合について平均流速 $2/3u_{10}$ に対する波長変化を求めたのが図-6 であ

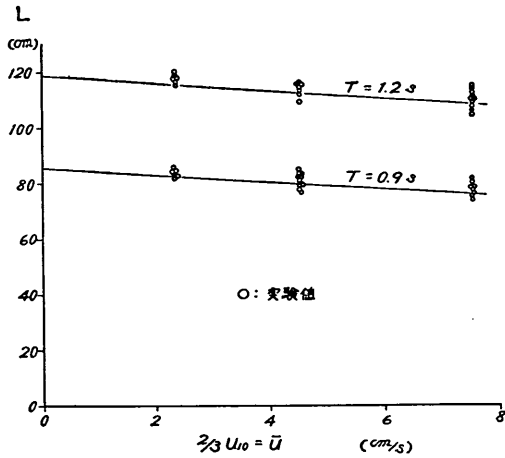


図-6 流れによる波高の変化

る。図には実験値もプロットしてあが、その平均流速は Q/A を用いた。実験波の波長測定は写真によって測られたが、実験の波は比較的フラットな波であり波のピークを決めるのが困難であった。したがって図-6 の実験値はかなり散乱しているが、流速増加とともに波長が減少する傾向は理論式とかなり一致して思われるが、強いてその傾向を求めれば、理論値より実験値のほうが波長減少の割合が少ないように見受けられる。

(2) 波高の変化

計算式は波長計算の場合と同じく浜田の理論式を用いる。流れがない場合半波高 A_{00} の進行状が、水深一定で放射線型流速分布の流れに入ったとき、屈折、回折、反射の現象が生じないと仮定すれば、そこでの波高 A_0 との比 $(A_0/A_{00})^2$ は(5)式で示される。

$$\left(\frac{A_0}{A_{00}}\right)^2 = \frac{\pi S^3(1-\beta)^2}{S_0^2} \coth 2\pi S_0 \times \frac{4\pi S_0 \operatorname{cosech} 4\pi S_0 + 1}{F_4(\beta, S)} \dots\dots(5)$$

β, S は(4)式と同じであり、 A_{00}, S_0 は $\beta \rightarrow \infty$ に対する値であり、 F_4 も F_2 同様 β, S の関数であり単位時間単位巾当りの Energy 伝達率の高次の項である。

(5)式を用いて実験の水理諸元について計算した結

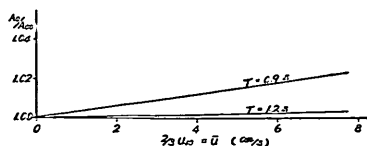


図-7 流速と波高比との関係

果は図-7に示す。図の横軸 $2/3u_{10}$ は図-6同様 $\bar{u}=Q/A$ をとっている。図-7 から $\bar{u}=8\text{cm/s}$ 以下の流れでは波高の増大は非常に小さく $T=0.9s$ で 1.02 倍以下、 $T=1.2\text{sec}$ で問題ならぬ程小さく、無視できる程度である。

一方実験での波高分布は図-3に示した如く流れがあるときは、流れのない場合より波高が増大し、これが距離とともに減衰してゆく状況が見られる。そこで実験の波高増加と(5)式とを対比してみる。この場合理論式は波が流れに直面した直後の性質について求められたものに対して、実験ではこのような条件でなく、流れを与えたときには波造板からの発生波(沖波)にすでに流れの影響が加わった形となっており、その上、水路内では侵入距離とともに減衰してゆく状況からすると、波高としていかなる点の波を採用すべきか問題である。ここでは河口端の波高 H_m を採用したがこれを表-2に示す。

表-2 河口端の波高 H_m (cm)

実験 $T(\text{sec})$ $Q(l/s)$	実験-A				実験-B		備考
	0.9		1.2		0.9		
	$H_0, e(\text{cm})$ $e=10$	12	10	15	$H_0=2$	3	
0	1.07	1.37	0.85	1.35	1.50	2.11	実験-B $T=1.2s$ は砕波のための除外 () 波高比
1.5	1.25 (1.17)	1.50 (1.09)	1.11 (1.30)	1.48 (1.09)	2.10 (1.40)	2.85 (1.35)	
3.0	1.51 (1.41)	1.62 (1.17)	1.20 (1.41)	1.77 (1.31)	2.20 (1.47)	3.10 (1.47)	
3.0 + Salt Wedge	1.75 (1.63)	2.05 (1.50)	1.58 (1.86)	1.91 (1.42)	-	-	
5	-	-	-	-	2.28 (1.52)	3.19 (1.51)	

表には流れのない場合との波高比 $H_m(Q_i)/H_m(Q_0)$ を()で示してあるが、総体的に波高の増加が大きく、流量 5l/s で 1.51~1.52 を示し 50% 以上の増大となっている。この程度の流速に対する理論値は 1.02 程度にくらべて実験値の増加は異常に大きく、10~50% 以上となっている。また流速増加に比例して波高増大の傾向は理論値と一致しているが、増加の割合は実験-Aと実験-Bでは異なっている。すなわち実験-Aではほぼ流況の増加に比例する傾向を示すのにくらべ、実験-Bの波高増加は流れが加わると急激に飛躍した後僅かずつ増大している。それにしてもこの波高増加は異常と思われるが原因については明確でない。しかし理論式で考えている、波が流れに直面した直後の波高であるのに対して、ここでは河口端の波高 H_m を採用したこと、あるいは実

験一A, Bの水路の違いによって波高比増大の傾向が異なることからすれば実験施設特に造波装置と流量溢流堰の関係が適当でなかったか。また、波を与えた後の河口端の流速分布が静水時の分布と異なっているのか、さらには河口端での水位上昇に伴う波高の増大。……が考えられる。いずれにしても今後より適切な施設を以って十分検討する必要がある。

(3) 二層流の場合

河口においては、海水、河川流との混合が行われ一般に表層水、底層水に塩分濃度の変化が生じている。塩分分布の型も混合の度合いによって異なるが、ここでは取扱い易い、濃度分布が不連続な二層型式の河口流について、塩水楔を発生させた場合の実験を扱っている。塩水楔の型、波高分布、波高比などは図-2, 3, 4 および表-2に $Q=3.01/s+Salt\ Wedge$ のケースとして単一流に併記してある。これらの各図および表から察知できることは、二層流型式上の波の変化が単一流の場合にくらべて、波高の増大、減衰が顕著なことである。単一流の場合、周期、水深が一定ならば波の性質は流れのみによって変化した。すなわち波長、波速、波高の変化は流速に逆比

例および比例する傾向がみられた。これからすれば、水路底層に海水が侵入した塩水楔上では表層流の流積が縮小される結果、その流速 (u_1) は増大することになり、したがって塩水楔上では単一流以上に流れの効果があると思われる。さらに表層水深が減少していることは波長と u との関係 $(c+u)^2 = \frac{g}{m} \tanh mh$ $m=2\pi/L$ から知られるように波長は短縮されることになる。このことから表-2の H_m は単一流にくらべて増大しているものと考えられる。

二層流型式の流れを通過する表面波および内部波の性質についての計算も浜田^④によってなされており(詳細は原論文を参照されたい)この理論式を利用し表面波について計算する。水理量は実験から得れた $h=11.2cm$, 表層水深 $h_1=6\sim 9.2cm$, 表層流速 $u_1=-5.6\sim -8.5cm/s$, 底層流速は逆流として $u_2=2.0cm/s$, 海水密度 $\rho_2=1.020$ を用い、その時に現れる表面波の波長を $L=60, 65, 70, 75, 80$ および $85.5cm$ とすると、表面波の波速は表-3の如く計算される。

表-3の波速には波が遡上する場合(+), 流れに重な

表-3 表面波の波速 (cm/s)

水深 (cm) 流速 (cm/s) 波長 (cm)	$h_1=6.0$	$h_1=6.0$	$h_1=8.1$	$h_1=8.1$
	$u_1=-8.5$ $u_2=2.0$	$u_1=-6.3$ $u_2=2.0$	$u_1=-6.3$ $u_2=2.0$	$u_1=-5.6$ $u_2=2.0$
60	82.21 -93.82	83.76 -92.10	82.73 -93.08	83.32 -92.46
65	84.28 -95.46	85.78 -93.78	84.69 -94.83	85.27 -94.21
70	86.06 -96.86	87.51 -95.22	86.38 -96.32	86.94 -95.71
75	87.59 -98.07	89.01 -96.45	87.83 -97.59	88.39 -96.99
80	88.93 -99.11	90.31 -97.52	89.09 -98.70	89.64 -98.11
85.5	90.19 -100.09	91.54 -98.53	90.29 -99.75	90.83 -99.16

った場合(-)が計算されているが、同一水深、波長の場合 u_1 が速いと波速が小さくなっている。表の中で左側の $h_1=60cm$, $u_1=-8.5cm/s$, $u_2=2.0cm/s$ のケースが実験の河口端における水理量に相当している。今表-3

から実験における単一流の波速と二層流上の波速の変化を推定する。実験 $Q=3.01/s+Salt\ Wedge$ のケースにおいて Wedge 先端部の平均流速は $\bar{u}=4.5cm/s$ であり $T=0.9\ sec$ の場合の波長は図-6から約 $80cm$ と推定さ

河口侵入波におよぼす河口流の効果

れ、周期の変化は全くないことから $C = \frac{L}{T} = 90\text{cm}$ となる。この波が二層流上の河口端においては、水深の減少、換言すれば u_1 の増加によって波長 L はさらに短縮することになり、この値を仮りに $70 \sim 75\text{cm}$ 程度と見積れば波速 $C = 86.06 \sim 87.59\text{cm/s}$ となり $2.5 \sim 3.0\text{cm}$ の減少となる。したがって、この過程での Energy 損失を無視すれば、 $L \cdot C$ の短縮に見合う程度の波高増大は十分考えられるので、二層流の実験ケースにおける波高増大の傾向が単一流の場合にくらべて大きいのは以上の理由であろうと思われる。

3.4 波の進行に伴う波高の減衰

流れを遡上する波は流れに直面した初期にはある程度の波高の増大を示すが、そのあと進行距離 x を増すと

もに次第に減衰してゆく、この傾向は流速の増加と対応している。これは図-3, 4 の各図にみられる。そして波高減衰の傾向は指数曲線で表せられるので前述(2)式と同様に(6)式で表現できる。

$$H = H_m \exp(-\alpha x) \quad \dots\dots(6)$$

ここで

α : 摩擦および流れの影響を含んだ波高減衰係数 (cm)⁻¹

(6)式にもとずいて実験の波高分布から α を計算した結果を表-4 に示した。表-4 は流量、周期、波高など水理諸要素別に示したので、これから各水理要素による α の特性が感得することができるであろう。ただし実験-B, $T = 1.2\text{sec}$ の各ケースは前述した如く侵入波は

表-4 波高減衰係数 $\alpha(\text{cm})^{-1} \times 10^{-3}$

test T (s) $e \cdot H_0$ (cm) Q (l/s)	実験-A				実験-B				備考
	0.9		1.2		0.9		1.2		
	$e=10$	12	10	15	$H_0=2$	3	4	5	
0	0.137	0.138	0.119	0.120	0.145	0.163	0.146	0.148	×; 碎波
1.5	—	0.140	—	0.142	0.156	0.166	×	×	
3.0	0.200	0.165	0.190	0.182	0.254	0.282	×	×	
3.0+Solt Wedge	0.257	0.291	0.199	0.267	—	—	—	—	
5.0	—	—	—	—	0.336	0.379	×	×	

河口端外で碎波し、さらに進行する間に再び波形を非碎波時の型に戻りながら進行とともに減衰してゆく。したがって波高減衰の傾向は碎波後と再成後の2つに区別されるべきであろうが、ここでは非碎波のケース同様一つの型として処理した。

表-4 から水理要素による α の特性を例記すれば下記の如くである。

- (i) 流量増加に比例して α も大きくなり、同一流量でも塩水楔が発生した場合の α の増加が顕著である。これは各周期、波高についても同様である。(実験-A)
- (ii) 周期による特性は周期が長い波の方が減衰は小さい。(実験-A, $e=10$ のケース)
- (iii) 沖波高 H_0 の違いによる α の変化は碎波のケ-

スを除いて微小ながら H_0 に比例する傾向がある。(α が小さくなるケースもある) 碎波の場合は碎波点が H_0 に逆比例して河口端外に移動するため水路内の波は小さくなり減衰も小さくなる。(実験-B)

これら特性のうち H_0 の違いすなわち波形勾配 H_0/L_0 は、流水中の波の波速 c が微小振幅波理論で表せ得るとすれば、波高減衰に影響しないことになるが実験では僅かながら α に影響を及ぼしている傾向がみられる。

各水理諸要素と侵入波高の減衰との関係は以上のような結果が得られたが流量との関係が強く認められる。これは流れを遡上する波の減衰を考える場合、波の境界層における摩擦による Energy 損失のみでなく、流れによる Energy 損失も重要な要素であることを示している。

したがって波高減衰の機構を明らかにするためには、前述の Energy の消散を見積る必要がある。このためには波および流れの運動にともなって水底に発達する境界層の挙動を明らかにする必要があり、さらに流れの渦動粘性の問題も生じ、その説明は非常に困難である。そこで実験結果からこの問題を考察してみる。流れを遡上するにともなう Energy 損失は、その点に含まれる Energy に比例するとし⁶⁾、流れの中の波速は微小振幅波理論が適用できるものとして Energy 保存則をあらわせば、つぎの関係式になる。

$$\frac{d}{dx}(c_0 \cdot E_x) = AE_x \quad \dots\dots(7)$$

ここで

$$c_0 = (nc + u) \quad E_x = \frac{1}{8} \rho g H_x^2 \quad A: \text{比例係数}$$

(7) 式を $x=0$ で $H_x = H_m$ の条件で積分すれば(8)

式となる。

$$H_x/H_m = \exp\left\{-\frac{A}{2(nc+u)}x\right\} \quad \dots\dots(8)$$

(8) 式の中には未知の係数 A が含まれるがこれを

$$\frac{A}{2(nc+u)} = \alpha \quad \dots\dots(9)$$

とおけば(10)式となり(6)式と全く同様になる。

$$H_x/H_m = \exp(-\alpha x) \quad \dots\dots(10)$$

さらに(10)式を前記(3)式の関係を用いて無次元表示すれば(11)式となる。

$$H_x/H_m = \exp(-\epsilon' x/L_s) \quad \dots\dots(11)$$

ここで ϵ' : 無次元波高減衰率 (αL_s)

L_s : 流れがない場合の波長

よって、 α ないし ϵ' が得られたならば、水路内の侵入波の波高 H_x を計算することができる。

表-5 波高減衰率 ϵ'

test T $e \cdot H$ Q	A				B				備考
	0.9		1.2		0.9		1.2		
	$e=10$	12	10	15	$H_0=2$	3	4	5	
0	0.0117	0.0118	0.0142	0.0143	0.0124	0.0139	0.0173	0.0176	
1.5	—	0.0120	—	0.0169	0.0133	0.0142	×	×	
3.0	0.0171	0.0141	0.0227	0.0217	0.0217	0.0241	×	×	×: 碎波
3.0+Salt Wedge	0.0220	0.0249	0.0237	0.0318	—	—	—	—	
5.0	—	—	—	—	0.0287	0.0324	×	×	

表-5 に実験から得られた ϵ' を示し、図-8 は流れとの関係 u/c_s (c_s : 静水時の波速) に対してプロットしたものである。本図はパラメーターとして h/L_s 、 T などによって表示すべきであるが、実験数が少なくそれらの関係を示し得ないので全実験をプロットしてあるが、 $\epsilon' \sim u/c_s$ の関係は測点の散乱が大きいけれどもほぼ一次的な関係を示し u/c_s 増加に対する ϵ' の増大が著しい。

4. 結 論

以上、小型実験水路を使用して流れを遡上する波の変

形について、河口流として二層流型式の密度流も加えて実験を行い、水路内の波高測定結果から、波高増大、波の進行にともなう波高の減衰について他の理論値と比較するとともに、波高減衰係数や減衰率を求め、波のエネルギー損失について簡単な考察も試みた。そして実験結果から、流れを遡上する波は、流れによって波高増大の作用を受けるとともに、遡上過程においてエネルギー消失によって波高を減衰させる相反する2つの作用によって波高は規成させられることが判明した。ここで実験結果を要約すればつぎのとおりである。

- 1) 流れによる波高増大率はほぼ流速に比例しており、実験値は非常に大きく理論値より 10~50% も大きい。
- 2) 流れを遡上する過程での波の減衰は流速に逆比例し流速が速いほど著しい。(非碎波の場合)
- 3) 二層流型式の流れは単一流の流れにくらべ波高の増大、減衰傾向が顕著である。
- 4) 実験から求めた減衰係数の傾向は周期の小さい波ほど速く減衰する。(表-4)
- 5) 流れを遡上する過程での波高変化は総括的に侵入距離 x に関する指数関数的に減衰する結果から (10) 式または (11) 式で示される。

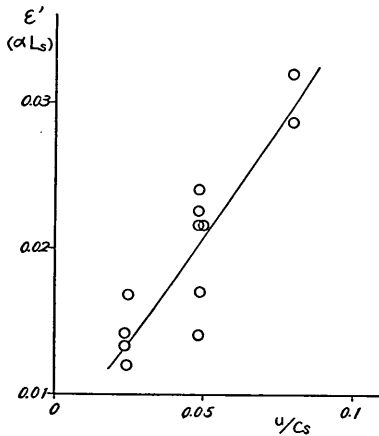


図-8 $\epsilon' \sim u/c_s$ の関係

6) 波高減衰率 ϵ' と流速波速比 u/c_s との関係はほぼ一次的な関係である。(図-8)

5. あとがき

本実験から河口への侵入波が流れを遡上してゆく過程での波高の変化は、二層流を含めて一応把握できたと考えられる。しかしながら実験は特定のケースであり、また実験方法、装置も満足すべきものでなかった。特に本実験での波高増大率は理論値にくらべ異常に大きかった点は実験装置のうち、流水と造波板位置の関係が相当波

高に影響を及ぼしていると考えられるしました。河口端付近の平面形状によっても影響があると思はれる。いずれにしても今後施設の改善によって、波高減衰の機構まで追及する必要がある。最後に本研究に対して、種々御援助を頂いた。第一港湾建設局新潟調査設計事務所、新潟港工事事務所の各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) Yu. Yi-Yuan : Breaking of waves by an opposing current. Trans. A. G. U. Vol. 33 No. 1, 1952
- 2) M. S. Longuet-Higgins & R. W. Stewart : The change in amplitude of short gravity waver on steady nonuniform currents. Jour of Fluid Mech, Vol 10, 1961
- 3) 浜田徳一, 加藤始 : 流れをさかのぼる流についての一計算, 第8回海岸工学講演集 (1961)
- 4) 岩崎敏夫, 佐藤道郎 : 流れを遡る波のエネルギーの減衰について, 第17回海岸工学講演論文集(1970)
- 5) 榎木享 : 河口閉そく機構に関する基礎研究 (第1報), 第12回海岸工学講演集 (1965)
- 6) 中村充, 他 : 波と流れによる砂の移動について(Ⅱ) 第17回海岸工学講演論文集 (1970)
- 7) 2)に同じ
- 8) J. Aputnam & J. W. Johnson : The Dissipation of wave energy by bottom friction, Traus, A. G. U. Vol. 30, No. 1, (1949)
- 9) R. P. Savage : Laboratory study of wave Energy by bottom friction and percolation, B. E. B teah memo, No. 31, (1953)
- 10) P. S. Eagleson : Laminer damping of osailatory waver. proc, A. S. C. E. Vol 88. No. HY 3, 1962
- 11) 岩垣雄一, 土屋義人 : 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究 (2), 第11回海岸工学講演集, 1964
- 12) C. E. Grosch : Laminar boundary Layer under a waver, physics of Fluids, Vol. 5, No. 10, 1962
- 13) 浜田徳一 : 沿岸波浪の工学的問題, 沿岸海岸研究ノート Vol. 3, No. 1, 1964
- 14) 3)に同じ
- 15) 浜田徳一 : 2層流と波, 第9回海岸工学講演集, 1962
- 16) 6)に同じ

(1971. 3. 31受付)