

深い水深の消波構造とその効果

—波の位相差の利用—

高 田 彰*

1. ま え が き

海岸構造物の設置水深が次第に大きくなってきたために、新しい形式の消波構造を開発しようとする気運にある。水深が増大すると、タービュレンスおよび摩擦によるエネルギー損失作用を利用した消波構造（たとえば、異型ブロックの斜面堤など）は工費が著しくかさむ。また、深い水深の不規則波を対象にすれば、ある波高以上の波にはほとんど消波効果がないという欠点があるので、今までと全く異なった消波原理による消波構造の出現が期待されている。

たとえば、波の位相差（共振現象）を利用する消波機構などは将来性のある消波形式と考えられる。この種の消波形式は、すでに、Valembos (1953)¹⁾, 1955²⁾, Sorokin & Roundnef (1953)³⁾, Jarlan (1961)⁴⁾, Morison (1965)⁵⁾, Le Méhauté (1965)⁶⁾ などによって提案され、中には実施されたものもあるが、実用化はあまり進んでいないようである。しかし、最近になって、この種の研究が次第に活発になり、たとえば、Terrette, Osorio & Lean (1968)⁷⁾, Marks & Jarlan (1968)⁸⁾, Richey & Sollitt (1970)⁹⁾, 長尾・加藤 (1970)¹⁰⁾, 土屋・芝野 (1972)¹¹⁾, 井島ら (1972)¹²⁾, 榎木・岩田 (1972)¹³⁾,¹⁴⁾ などの研究があげられる。

本研究は、これまでの研究を実用的な観点より再検討し、さらに発展させようとしたものであり、波の位相差による海岸堤防、防波護岸の波の打上げ高の減少、越波の防止を目的としている。本研究では不透過鉛直壁（海岸堤防、防波護岸）の前面に鉛直の単一消波板（いわゆるカーテンウォール）を設置するような消波構造を対象とし、単一消波板の位置、規模（静水面上の天端高、静水面下の遮蔽深さ）などによる波の打上げ高、越波量の減少効果を実験的に明らかにしたい。さらに、Wiegel (1960)¹⁵⁾, 森平・柿崎・合田 (1964)¹⁶⁾ のカーテンウォール (rigid vertical thin barrier) に関する透過波の研究、榎木・岩田 (1972)¹³⁾ の多孔式鉛直の消波岸壁に関する波の変形の研究、著者 (1973)¹⁷⁾ の越波量の近似計算法に関する研究のそれぞれの成果を応用して、この種の消波構造を用いた場合の波の打上げ高、越波量の算定

式をそれぞれ提案し、それらの妥当性を実験的に検討したい。

2. 研究方法および算定式の提案

不透過鉛直壁（海岸堤防、防波護岸）の前面に鉛直の消波板を設置する消波構造には、消波板が単一の場合と複数並列の場合が考えられる。本研究では、図-1 に示

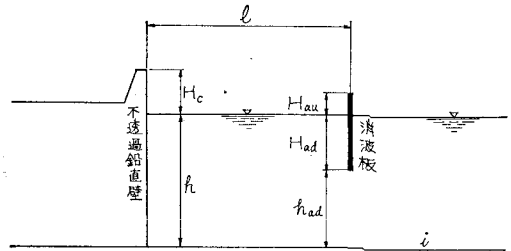


図-1 波の位相差を利用する消波構造（単一消波板の場合）

すような、単一消波板を対象とし、不透過鉛直壁と消波板との間隔 l 、消波板の静水面上の天端高 H_{au} 、静水面下の遮蔽深さ H_{ad} 、不透過鉛直壁（海岸堤防、防波護岸）の天端高 H_c 、堤脚水深 h とすれば、入射波長 L 、入射波高 H に対して不透過鉛直壁（海岸堤防、防波護岸）の静水面上の波の打上げ高 R 、1 周期の越波量 Q がどの程度減少するかなど、波の位相差による消波効果を明らかにしたい。また、 R および Q の算定式を提案し、その妥当性を実験的に検討したい。

(1) 波の打上げ高 R の算定式

不透過鉛直壁と消波板との間の水域（いわゆる共振水域）において、波の反射、透過を繰返す、いわゆる波の反復作用による成分波を加算することができると仮定すれば、不透過鉛直壁の波の打上げ高は微小振幅波による複素関数の表現で取扱うことによって近似計算できる。榎木・岩田 (1972)¹³⁾ は Le Méhauté の考え方を発展させ、微小振幅波理論によって求まる打上げ高（静水面上の波頂高） R^* を次のように提案している。ただし、共振水域内の距離による波の減衰は無視し、不透過鉛直壁（海岸堤防、防波護岸）の反射は完全反射とする。

a) 無限の反復作用の場合

$$\frac{R^*}{H} = \frac{r_T}{\sqrt{1 - 2r_R \cos \frac{4\pi l}{L} + r_R^2}} \dots\dots\dots (1)$$

* 正会員 工博 中部工業大学助教授 土木工学教室

ここに、 r_T : 単一消波板による波の透過率、 r_R : 単一消波板による波の反射率、である。

r_T と r_R は質量保存則より、次の関係で結びつけられている¹³⁾。

$$r_T + r_R = 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

r_T については、Ursell (1947)¹⁸⁾、Wiegel (1960)¹⁵⁾、森平・柿崎・合田 (1964)¹⁶⁾ などの研究があり、Wiegel は単一消波板下部の開口部を通過する入射波のエネルギーが透過波のエネルギーに等しいとおき、次の式を提案している¹⁵⁾。

$$r_T = \frac{H_T}{H} = \sqrt{\frac{\sinh \frac{4\pi h_{ad}}{L} + \frac{4\pi h_{ad}}{L}}{\sinh \frac{4\pi h}{L} + \frac{4\pi h}{L}}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 h_{ad} : 消波板の下端より海底までの深さ(図-1 参照)、 H_T : 単一消波板の透過波高、である。

一方、森平・柿崎・合田 (1964) は Ursell の式を修正して次の式を提案している¹⁶⁾。

$$r_T = \frac{F(2\pi H_{ad}/L) - F(2\pi h/L)}{1 - F(2\pi h/L)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$F(\xi) = \frac{K_1(\xi)}{\sqrt{\pi^2 I_1^2(\xi) + K_1^2(\xi)}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 I_1 , K_1 はそれぞれ次数 1 の第 1 種および第 2 種変形ベッセル関数である。

実験値は一般に式(3)と(4)の値の間にあるが、 h/L が大きいときは式(3)の適合性がよく、 h/L が小さいときは式(4)の適合性がよい¹⁶⁾。本研究では深い水深を対象としているので、式(3)を適用することにした。

b) 有限の反復作用の場合 (高次の反復を省略した場合)

$$\frac{R^*}{H} = r_T \sqrt{1 + r_R^2 + 2 r_R \cos \frac{4\pi l}{L}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

以上のようにして微小振幅波の打上げ高 R^* を計算することができるので¹³⁾、有限振幅波の打上げ高 R は R^* に有限振幅重複波理論の非線形効果の項 (波高中分面の静水面上の高さ) を加算することによって近似的に計算できる¹⁷⁾。いま、有限振幅重複波理論の第 2 次近似式を適用すれば、次の式で示される。

$$\frac{R}{H} = \frac{R^*}{H} + \frac{\pi}{4} \frac{H}{L} \left(\frac{R^*}{H} \right)^2 \times \left(3 \coth^2 \frac{2\pi h}{L} + \tanh \frac{2\pi h}{L} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

本研究では、式(7)の妥当性を実験的に検討したい。

(2) 越波量 Q の算定式

共振水域内の水面波形の仮想入射波高を $H_i = R^*$ とする有限振幅重複波と仮定し、その空間波形 $\eta_r(x)$ の仮想天端 $z = H_0$ より上の容積 S が 1 周期当りの越波量 Q に比例するとおけば、 Q は次のように示される¹⁷⁾。

$$Q = a_r S = a_r \int_0^{x_0} \{ \eta_r(x) - H_0 \} dx \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 a_r : 越波量係数、 x_0 : $\eta_r(x) = H_0$ の解、である。

いま、 $\eta_r(x)$ に有限振幅重複波理論の第 2 次近似式を用いれば、 $\eta_r(x)$ は次の式で示される¹⁷⁾。

$$\eta_r(x) = R^* \cos \frac{2\pi x}{L} + \frac{\pi}{4} R^* \frac{R^*}{L} \times \left(3 \coth^2 \frac{2\pi h}{L} + \tanh \frac{2\pi h}{L} \right) \cos \frac{4\pi x}{L} \quad \dots\dots (9)$$

式(9)を式(8)に代入すれば、 Q は次のように示される。

$$Q = a_r S = a_r \left[\frac{R^* L}{2\pi} \sin \frac{2\pi x_0}{L} + \frac{(R^*)^2}{16} \times \left(3 \coth^2 \frac{2\pi h}{L} + \tanh \frac{2\pi h}{L} \right) \sin \frac{4\pi x_0}{L} - H_0 x_0 \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 x_0 は $\eta_r(x) = H_0$ において求めるが、次の式で計算できる。ただし、 $x_0 < L/4$ の範囲で求めるものとする。

$$\cos \frac{2\pi}{L} x_0 = (1/4\delta) \left\{ \sqrt{1 + 8\delta \left(\delta + \frac{H_0}{R^*} \right)} - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 δ は次の式で示される。

$$\delta = \frac{\pi}{4} \frac{R^*}{L} \left(3 \coth^2 \frac{2\pi h}{L} + \tanh \frac{2\pi h}{L} \right) \quad \dots\dots (12)$$

式(10)の a_r は、広範囲の実験から、その特性を明らかにされなければならない。しかし、別の考え方として、消波板を有しない不透過鉛直壁だけの場合の越波量算定式 (有限振幅重複波の空間波形と越波量との相関特性) における越波量係数 a_s を近似的に適用する方法 ($a_r \approx a_s$)、あるいは、 a_r と a_s との関連性を検討する方法 ($a_r = \varepsilon a_s$, ε : 相関係数) が考えられる。本研究では、前者の方法を採用し、仮想入射波高 H_i を R^* 、 $a_r \approx a_s$ と仮定すれば、これまでに提案した著者の算定式¹⁷⁾から、次の式で近似的に示される。

$$a_r \approx a_s = 9.3 \{ (R - H_0) / R^* \}^{1/2} \frac{(R^*)_0}{L_0} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 R : 式(7)で計算される波の打上げ高、 $(R^*)_0$: 堤脚水深 h における仮想入射波高 $H_i = R^*$ に対応する深水波高 ($= R^* / K_s$, K_s : 浅水係数)、 L_0 : 入射波の深水波長、である。

本研究では、式(13)の a_r を用いた場合の式(10)の妥当性を実験的に検討したい。

3. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

本実験は屋外実験場に設置されている長さ 30 m、幅 0.8 m、高さ 1.8 m の片面ガラス張りの造波水路で行な

表—1 実験条件の諸元

波	$h=135\text{ cm}$ $T=1.8\text{ sec}$ $L=477.5\text{ cm}$ $H=27.2\text{ cm}$							
	$H/L=0.0570$		$h/L=0.283$		$h/H=4.96$			
単 一 消 波 板	$l(\text{cm})$	19	40	55	74	98	115	136
		155	173	196	215	233	255	277
		298	317	335	355	376	397	417
		438	458	476	498			
	l/L	0.04	0.08	0.12	0.15	0.21	0.24	0.29
		0.32	0.36	0.41	0.45	0.49	0.54	0.58
		0.62	0.66	0.70	0.74	0.79	0.83	0.87
		0.92	0.96	1.00	1.04			
	$H_{au}(\text{cm})$	0	10	20	40			
	H_{au}/H	0	0.368	0.736	1.472			
	$H_{ad}=30\text{ cm}$		$H_{ad}/H=1.102$		$H_{ad}/h=0.222$			
	$H_{ad}/L=0.0628$		$h_{ad}=105\text{ cm}$		$h_{ad}/H=3.860$			
	$h_{ad}/h=0.778$		$h_{ad}/L=0.220$					
不透過鉛直壁	$H_o(\text{cm})$	15	40					
	H_o/H	0.552	1.472					

った。造波機はフラップ式造波板 (3.7 kW) により、周期 $T=1.5\sim 3\text{ sec}$ 、最大波高 $H_{\max}=40\text{ cm}$ の規則波を発生させることができる。

(2) 実験方法

海底勾配を水平とし、実験水深 $h=135\text{ cm}$ 、実験波の周期 $T=1.8\text{ sec}$ 、実験波の波高 $H=27.2\text{ cm}$ とした。消波板は 10 m/m の樹脂板を用い、静水面下の遮蔽深さ $H_{ad}=30\text{ cm}$ (下端水深 $h_{ad}=105\text{ cm}$) とし、静水面上の高さ $H_{au}=0, 10, 20, 40\text{ cm}$ の 4 種類に変化させ、 $l=19\sim 498\text{ cm}$ の範囲で消波板の位置を 28 種類変化した。不透過鉛直壁の天端高は、打上げ高の実験において、 $H_0=40\text{ cm}$ (非越波)、越波量の実験において、 $H_0=15\text{ cm}$ とした。実験条件の諸元およびその無次元量は表—1 のように示される。

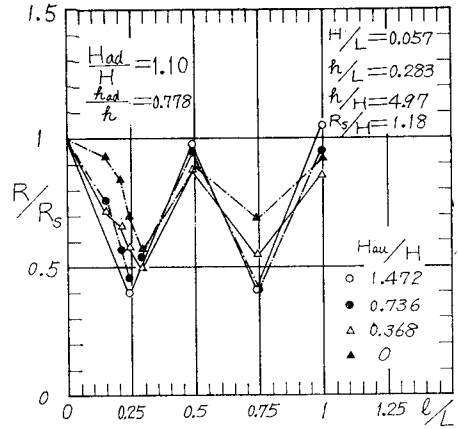
実験は第 7～9 波の 3 波の R および Q を測定し、 r_T は式 (3) で、 r_R は式 (2) で計算することとし、 r_T および r_R の実験を省略した。

4. 波の打上げ高の実験結果とその考察

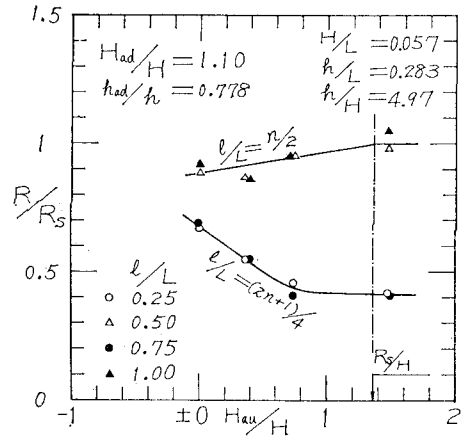
(1) 波の打上げ高の減少効果

図—2 は、波の打上げ高 R が消波板のない不透過鉛直壁の場合 (入射波高 H の有限振幅重複波) の波頂高 R_s ($R_s/H=1.18$) に比較してどの程度減少効果があるかを調べるために R/R_s と l/L との関係を H_{au}/H のパラメーターで表わしたものである。これより、実験値は $R/R_s \leq 1$ であり、消波効果は認められるが、 $l/L=1/4, 3/4, \dots, (2n+1)/4$ ($n=0, 1, 2, \dots$) において R/R_s は極小で、消波効果が著しく、 $l/L=1/2, 1, \dots, n/2$ において R/R_s は極大で消波効果が悪い。このように消波効果におよぼす l/L の影響はきわめて大きい、長尾・加藤 (1970)¹⁰、樫木・岩田 (1972)^{13,14} の研究成果と一致する。

図—3 は、 R/R_s と H_{au}/H との関係を l/L のパラメ



図—2 消波板の位置 (l/L) と R/R_s との関係 ($R_s/H=1.18$)



図—3 消波板の天端高 (H_{au}/H) と R/R_s との関係

ーターで示したものである。これより、 $l/L=(2n+1)/4$ では H_{au}/H が小さいほど (消波板の天端を越波する量が多いほど) R/R_s が大きくなるが、 $H_{au}/H=0$ で $R/R_s=0.68$ 、 $H_{au}/H=0.5$ で $R/R_s=0.5$ 、 $H_{au}/H=0.74$ で $R/R_s=0.43$ となる。一方、 $l/L=n/2$ では、 H_{au}/H が小さいほど R/R_s が小さくなるが、 $H_{au}/H=0$ でも $R/R_s=0.9$ 程度である。

(2) 波の打上げ高の算定式の適合性

式 (3) に $h_{ad}/L=0.220$ 、 $h/L=0.283$ を代入すれば、本実験の条件では $r_T=0.71$ となる。また式 (2) より $r_R=0.29$ となる。これらを式 (1) あるいは式 (6) に代入して R^*/H を計算すれば次のように示される。

a) 無限の反復作用の場合の R^*/H

式 (1) より次の式で示される。

$$R^*/H=0.71/\sqrt{1.0841-0.58 \cos 4\pi l/L} \dots (14)$$

b) 有限の反復作用の場合の R^*/H

式 (6) より、次の式で示される。

$$R^*/H=0.71\sqrt{1.0841+0.58 \cos 4\pi l/L} \dots (15)$$

以上の結果、実験条件の R/H は、種々の l/L に対

する R^*/H を求めて、式(7)より次のように示される。

$$\frac{R}{H} = \frac{R^*}{H} + 0.202 \left(\frac{R^*}{H} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

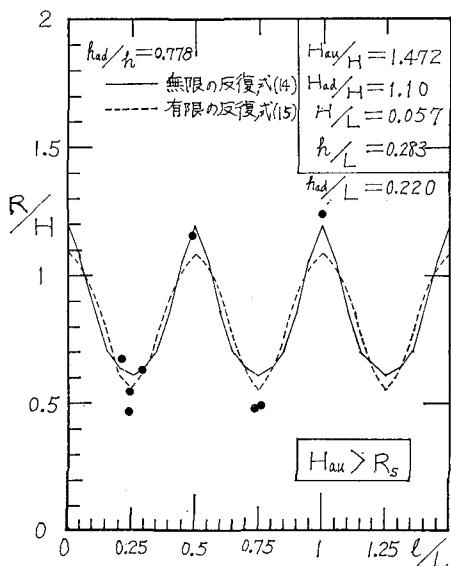
図-4 は式(16)の計算値と実験値を R/H と l/L との関係で示したもので、実線が式(14)の R^*/H を用いた場合、点線が式(15)の R^*/H を用いた場合を示している。図-4(a)は $H_{au} > R_s$ (消波板の非越波) の場合の実験値と比較しているが、計算値は実験結果をかなりよく説明していることがわかる。特に、 $l/L = (2n+1)/4$ では式(14)を用いた場合の適合性がよく、 $l/L = n/2$ では式(15)

の適合性がよいようである。図-4(b)は $H_{au} < R_s$ (消波板の天端を越波する場合) の実験値と比較しているが、この場合も計算値は実験結果をかなりよく説明している。しかし、 $l/L \leq 1/4$ 、 $l/L = (2n+1)/4$ の計算値の適合性は H_{au}/H が小さくなると実験値よりも過小な値を与える。これは、消波板の天端を多量に越波すると、消波板の透過率 r_t は式(3)で求まる値よりも大きくなるためと考えられるので、 H_{au}/H の小さい場合の r_t の算定式を検討しなければならない。

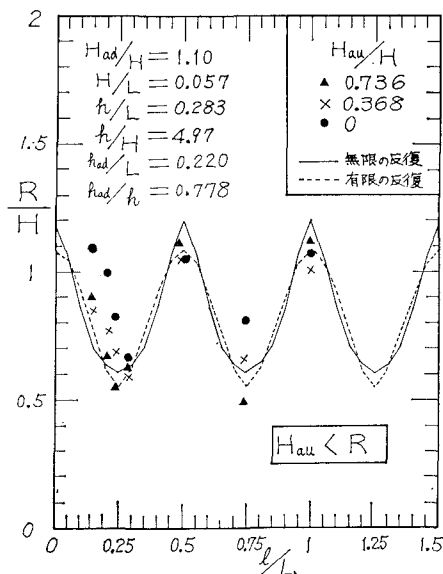
以上の考察より、 $H_{au}/H > 0.5$ では式(7)の適合性がかなりよいので、2.(1)で述べた考え方はほぼ妥当であることがわかった。

(3) 共振水域内外の空間波形

消波板の位置 l/L によって共振水域内外の空間波形は著しく異なる。図-5 は、不透過鉛直壁の水位が最高に昇りきった瞬間(波の打上げ高 R) のときの空間波形 $\eta_r(x)$ と消波板の位置 l/L との関係を示し、図-5(a)は $l/L = 1/4$ 、図-5(b)は $l/L = 1/2$ 、図-5(c)は $l/L = 3/4$ の場合の $\eta_r(x)$ の模式図である。これらより、図-5(a)、(c)のような $l/L = (2n+1)/4$ ($n=0, 1, 2, \dots$) では、消波板前後に位相差が生じ、その結果 R が小さくなり、著しい消波効果のあることがわかる。一方、図-5(b)のような $l/L = n/2$ では、共振水域内外の水位は全く同調し、あたかも消波板が無いときと同様な上下振動(消波板の位置で完全重複波の腹の部分)となり、その結果、 R はほとんど減少しない(消波効果が認められない)ことがわかる。なお、空間波形 $\eta_r(x)$ の定量的な考



(a) 消波板の非越波 ($H_{au} > R_s$) の場合



(b) 消波板の越波 ($H_{au} < R_s$) の場合

図-4 波の打ち上げ高の算定式の適合性

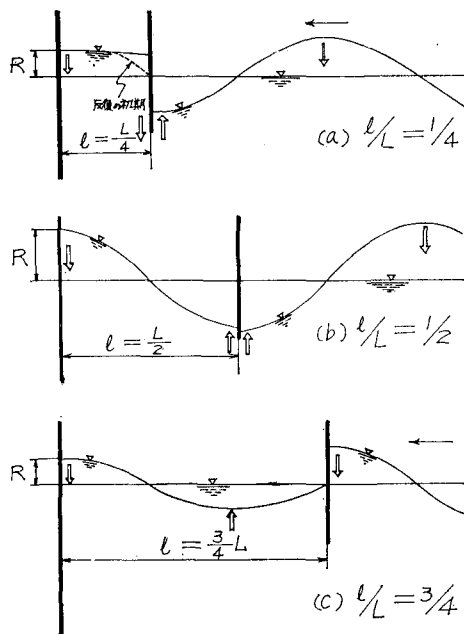


図-5 R における共振水域内外の空間波形(模式図)

察は今後の研究に待たなければならない。

5. 越波量の実験結果とその考察

(1) 越波量の減少効果

図-6 は越波量 Q が不透透鉛直壁だけの場合 (入射波高 H の有限振幅重複波) の越波量 $Q_s (Q_s/TH^2=1.5 \times 10^{-1})$ に比較して、どの程度越波量の減少効果があるかを Q/Q_s について調べたものであり、 Q/Q_s と l/L との関係を H_{au}/H のパラメーターで示している。これより、実験値は $Q/Q_s \leq 1$ であり、 R/R_s の場合と同様に、 $l/L = 1/4, 3/4, \dots (2n+1)/4 (n=0, 1, 2, 3, \dots)$ の越波量の減少効果が著しく、 Q/Q_s 極小値となる。一方、 $l/L = 1/2, 1, \dots n/2$ の越波量の減少効果は悪く、 Q/Q_s は極大値となる。

図-7 は Q/Q_s と H_{au}/H との関係を l/L のパラメーターで示したものである。これより、消波効果の最もよい

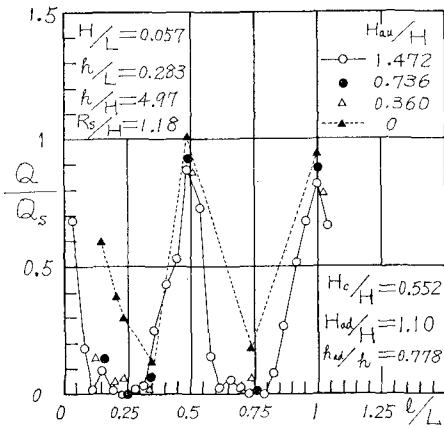


図-6 消波板の位置 (l/L) と Q/Q_s との関係 ($Q_s/TH^2=1.5 \times 10^{-1}$)

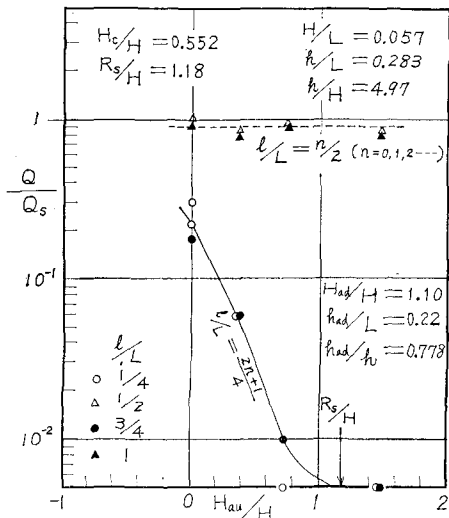
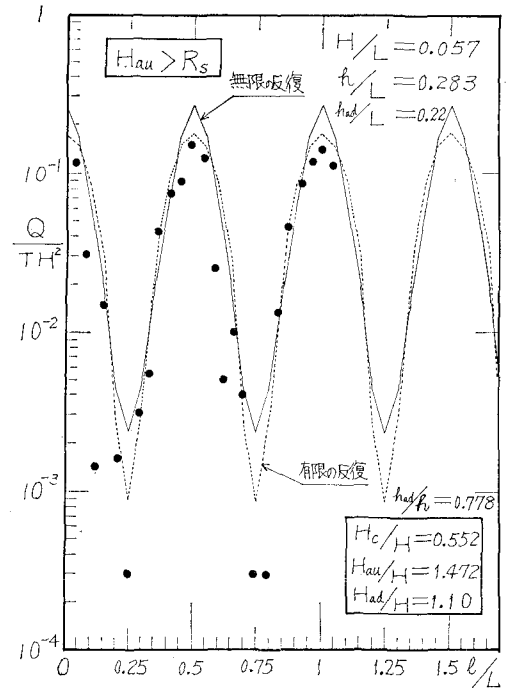
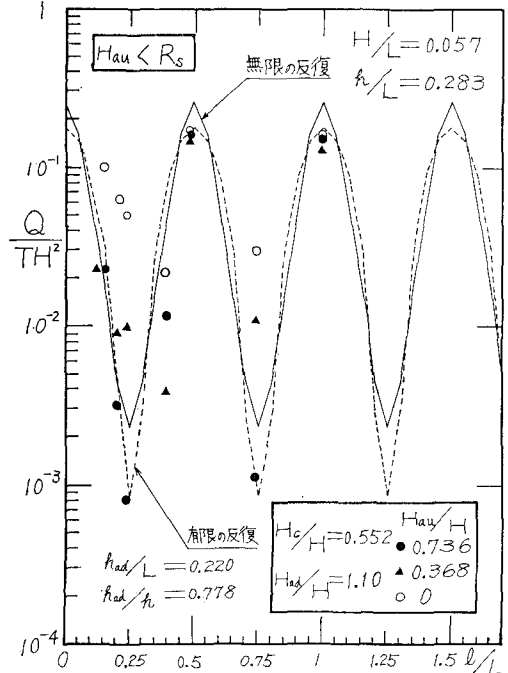


図-7 消波板の天端高 (H_{au}/H) と Q/Q_s との関係

位置 $l/L = (2n+1)/4$ では H_{au}/H が小さいほど Q/Q_s が大きく、 $H_{au}/H > 0.2$ で $Q/Q_s < 0.05$, $H_{au}/H = 0 \sim 0.2$ で $Q/Q_s = 0.05 \sim 0.3$ 程度である。一方、消波効果の最も悪い位置 $l/L = n/2$ では H_{au}/H の大小にあまり影響



(a) 消波板の非越波の場合 ($H_{au} > R_s$)



(b) 消波板の越波の場合 ($H_{au} < R_s$)

図-8 越波量算定式の適合性

されず、 $Q/Q_s=0.9$ 程度である。

(2) 越波量算定式の適合性

空間波形の仮想天端上の容積 S は、実験条件を式 (10) に代入すれば、次のように示される。ただし、 S の単位は $\text{cm}^3/\text{T} \cdot \text{cm}$ である。($T=1.8 \text{ sec}$)

$$S = 76.0 R^* \sin \frac{2\pi}{L} x_0 + 0.282 (R^*)^2 \sin \frac{4\pi}{L} x_0 - 15 x_0 \quad (\text{cm}^3/\text{T} \cdot \text{cm}) \quad (17)$$

ここに、 x_0 は、式 (12) で実験条件 ($h/L=0.283$, $L=477.5 \text{ cm}$) の $\delta=0.0074/R^*$ を求め、これを式 (11) に代入すれば、 $H_0=15 \text{ cm}$ において次の式で計算できる。ただし、 R^* および H の単位は cm とする。

$$\cos \frac{2\pi}{L} x_0 = \frac{-1 + \sqrt{1 + 0.0593 R^* \{0.00741 R^* + (15/R^*)\}}}{0.0296 R^*} \quad (18)$$

越波量係数 a_r は式 (13) に実験条件 ($H_0=15 \text{ cm}$, $L_0=505.1 \text{ cm}$) を代入すれば次の式で示される。ただし R , R^* , $(R^*)_0$ の単位は cm とする。

$$a_r \approx 9.3 \{ (R-15)/R^* \}^{1/2} (R^*)_0 / 505.1 \quad (19)$$

以上の結果、式 (17) と式 (19) より計算越波量 $Q_{\text{cal}} = a_r S$ を求めることができる。図-8 の実線および点線はその計算結果を示したものであり、実線は無限の反復作用の場合 (式(1)の適用) であり、点線は有限の反復作用の場合 (式(6)の適用) である。

a) 消波板の非越波 ($H_{au} > R_s$) の場合の実験

図-8(a)は Q_{cal} と消波板の天端を越波しない場合の実験越波量 Q_{exp} とを比較したものである。これより、計算値は実験結果をかなりよく説明しており、特に、点線 (有限の反復の場合) との適合性がよい。これは、本実験が第9波までの波を対象として有限の反復作用の結果を測定したためと考えられるが、詳細については今後検討しなければならない。

b) 消波板の越波 ($H_{au} < R_s$) の場合の実験

図-8(b)は Q_{cal} と消波板の天端を越波する場合の実験値 Q_{exp} とを比較したものである。これより、この場合も計算値は実験結果をかなりよく説明しているが、 H_{au}/H が小さくなると、 $l/L \leq 1/4$ 及び $l/L = (2n+1)/4$ 前後では計算値がやや過小な値を与えることがわかる。すなわち、 $H_{au}/H=0.736$ では適合性がよい (特に点線がよく合う) が、 $H_{au}/H=0.368$ 及び 0 で $l/L \leq 1/4$ および $l/L=3/4$ 前後ではやや過小な値を推定することになる。これは、この場合の実験の打上げ高 $(R/H)_{\text{exp}}$ は式(7)で求められる計算の打上げ高 $(R/H)_{\text{cal}}$ よりもやや過大な値を与えるためと考えられるので、 $H_{au} < R_s$ (消波板の越波) の場合には、 r_T の算定式(3)を再検討することが必要であろう。

以上の考察より、式 (13) を用いた式 (10) の適合性は $H_{au}/H > 0.5$ においてかなりよいので、2. (2) の考え方の妥当性がほぼ実証できたと考えられる。なお、広範囲の実験によって、 R , Q , r_T を定量的に検討することが今後の研究課題として残されよう。

6. 結 論

規則波の重複波水深領域において、不透過鉛直壁 (海岸堤防、防波護岸を想定) の前方に $(L/4)(2n+1)$, ($n=0, 1, 2, 3, \dots$) の距離だけ離して静水面上 $H_{au}/H > 0$, 静水面下 $H_{au}/H > 1$ 程度の単一消波板 (いわゆるカーテンウォール) を設置すれば、波の位相差による消波効果が発揮され、波の打上げ高、越波量を著しく減少させることができる。

本研究のおもな成果は次のように要約される。

(1) $H_{au}/H \geq 0$, $H_{au}/H > 1$ では、 $R/R_s \leq 1$ となるが、 l/L によって消波効果は著しく異なり、 $l/L = (2n+1)/4$ で極小値、 $l/L = n/2$ で極大値を与える。 $l/L = (2n+1)/4$ では、 H_{au}/H が小さいほど消波板の越波のため R/R_s は大きくなる。

(2) R/H の算定式は式 (7) で示され、実験結果をよく説明できるが、特に $H_{au}/H > 0.5$ においてかなり適合性がよい。また、式(7)の中で示される R^* は式(1)あるいは式(6)で計算できるが、式(6)を用いた場合の $(R/H)_{\text{cal}}$ の方が一般に精度がよい (ただし、有限反復の実験結果と比較した場合)。

(3) 消波板前後の水面波形は、消波効果の最もよい消波板の位置 $l/L = (2n+1)/4$ で最大の位相差を生じ、消波効果の最も悪い消波板の位置 $l/L = n/2$ で位相差を生じない。

(4) $H_{au}/H \geq 0$, $H_{au}/H > 1$ では、 $Q/Q_s \leq 1$ となるが、 l/L によって消波効果は著しく異なり、 $l/L = (2n+1)/4$ で極小値、 $l/L = n/2$ で極大値を与える。 $l/L = (2n+1)/4$ では、 H_{au}/H が小さいほど Q/Q_s が大きくなるが、 $l/L = n/2$ では、 H_{au}/H の影響は $H_{au}/H \geq 0$ においてほとんど無視できる。

(5) Q の算式は式(10)で示され、その式中の越波量係数 a_r を式(13)で計算すれば、実験結果をよく説明できるが、特に $H_{au}/H > 0.5$ においてかなり適合性がよい。また、式(6)を用いた場合の Q_{cal} は式(1)を用いた場合の Q_{cal} よりも一般に精度がよい (ただし、有限反復の実験結果と比較した場合)。

参考文献

- 1) Valembois, J. : Etude de l'action d'ouvrages resonants sur la propagation de la houle, *Minnesota International Hydraulic Convention*, 1953.
- 2) Valembois, J. et Birad, C. : Les ouvrages resonants et leur application à la protection des ports, *Proc. of 5th Conference on Coastal Engineering*, 1955.
- 3) Djounkovski, N. N. et Bojitch, P. K. : La houle et son action sur les cotes et les ouvrages cotiers, 1959.
- 4) Jarlan, G. E. : A perforated vertical wall breakwater, *Dock and Harbour Authority*, April, 1961.
- 5) Morison, M. H. : Fishing Harbors and their installations, 21st PIANC, Stockholm, 1965.
- 6) Le Méhauté, B. : Wave absorbers in harbors, *National Eng. Society Company, Contract, Technical Report No. DA-22-079-CIVENG-64-81*, p.124, June, 1965.
- 7) Terrett, E. L., Osorio, D. C. and Lean, G. H. : Model studies of a perforated breakwater, *Proc. of 11th Conf. on Coastal Eng.*, pp.1104~1120, 1968.
- 8) Marks, W. and Jarlan, G. E. : Experimental studies on a fixed perforated breakwater, *Proc. of 11th Conf. Coastal Eng.*, pp.1121~1140, 1968.
- 9) Richey, E. P. and Sollitt, C. K. : Wave attenuation by porous walled breakwater, *Proc. of ASCE*, pp.643~663, August, 1970.
- 10) 長尾義三・加藤久徳 : 直立消波岸壁に関する二, 三の実験的研究, 第17回海岸工学講演会論文集, pp.145~135, Nov., 1970.
- 11) 土屋義人・芝野照夫 : 護岸の越波特性とその防災対策について, 土木学会第27回年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp.43~46, Oct., 1972.
- 12) 井島武士・奥蘭英明・湯村やす・坂井久雄 : 遊水部をもつ直立消波防波堤と護岸, 第19回海岸工学講演会論文集, pp.185~192, Nov., 1972.
- 13) 榎木 亨・岩田好一朗 : 多孔式鉛直消波岸壁構造物の水理特性について, 昭和47年度関西支部年次学術講演会講演概要集, pp. II-37-1~3, June, 1972.
- 14) 榎木 亨・岩田好一朗 : 透過構造物による波の変形について, 第19回海岸工学講演会論文集, pp.199~204, Nov., 1972.
- 15) Wiegel, R. L. : Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier, *Proc. of ASCE*, Vol. 86, No. WW 1, March, 1960.
- 16) 森平倫生・柿崎秀作・合田良実 : カーテン防波堤とその特性について, 港湾技術研究所報告, 3.1 pp.1~27, April, 1964.
- 17) 高田 彰 : 波の打ち上げ空間波形と越波量の相関特性, 土木学会論文報告集, No.212, pp.25~39, April, 1973.
- 18) Ursell, F. : The effect of a vertical barrier on surface waves in deep water, *Proc. of Cambridge Phil. Soc.*, Vol. 43, Part 3, pp.374~382, July, 1947.