

水面付近を遮蔽した場合の波のうちあげ高に関する研究

久宝雅史*・竹沢三雄**・中川善雄***

1. 概 説

カーテン防波堤、浮防波堤などのように、波の水面付近を遮蔽する構造物の設計にあたって、特に、水面付近の波の挙動に関する事項、たとえば、波の圧力などがある程度明確にされる必要がある。ここに、その進行波の峯付近の挙動として、静水面付近以上を固定板で鉛直に遮蔽した場合の波のうちあげ高に関する模型実験を行ない、これを解析することによって、波の峯付近の動圧および静圧の大きさを得る手段とした。

波圧に関する研究はさかんであり、本研究に若干関連したものとして、Ursell¹⁾、Wiegel²⁾、森平・柿崎ら³⁾の研究報告があるが、いずれも、遮蔽板が波高以下に達している場合である。本研究は、特に、波の峯付近の挙動を知るために、前述のように、波底以上に遮蔽板がおかれた場合で、この種の研究は、比較的少ないのではないと思われる。

この研究は、もとより、規則波の進行波に関するもので、いわば基礎的研究であり、これを解析するためにも微小振幅波理論による多くの仮定を設けたので、そのまま、実際の現地の波にあてはめられるかどうかの問題はあるが、若干とも波峯付近の波圧の問題の解明に資したと考えたものである。

2. 実験方法

実験に用いた造波水槽は、技研興業(株)八王子技術研究所所有の水路全長 155m、幅員 1.40m で、フラッター式の造波機をもつ大型造波水槽である。観測部分における水路勾配は、1:30 の砂利床で、水路終端は 1:3 の勾配にし、さらに消波ブロックにて消波し、反射波を少なくしようとした。

構造物は、角材(5×5cm)を柱にし、上部はくさびで、下部は水路床に埋込み固定し、これに 140×90×1.5cm の遮蔽板(ベニヤ製)を取付け、上下可動の構造にした(図-1, 2)。この遮蔽板より沖側 0.5m と陸側および柱の側面にそれぞれスタフを設置し、入射波高、遮蔽板前面および背面の波峯位の上昇高を観測した。観測はす

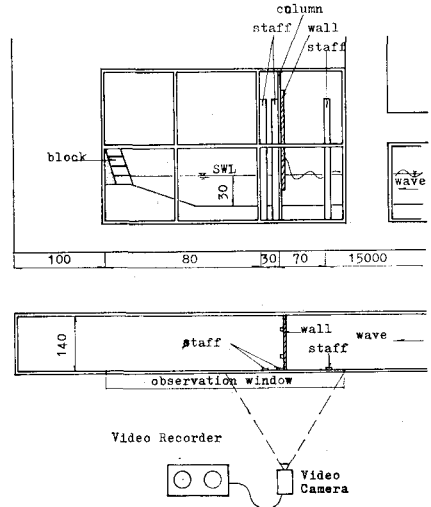


図-1 実験装置

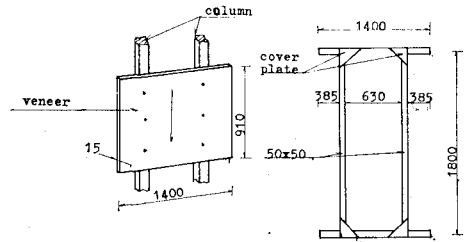


図-2 遮蔽装置

べてビデオテープレコーダー(日本ビクター製 PV 4500)にて録画し、その再生画像から、スローモーションとストップ装置を併用してデータを読み取った。

実験は、次の要領で行なった。

1. 水深: 30 cm (一定)
2. 周期: $T=2.8, 2.6, 2.4, 2.2, 2.0, 1.8, 1.6, 1.2, 1.0$ sec
3. 遮蔽板の下端は静水面に平行、波の進行方向に直角とする。
4. 下端は静水面上 14 cm から 2 cm ずつ下げる。
5. 波は造波後、数波目より約 10 波のものについて板付近でビデオに記録する。ただし、この中には板の下端が高すぎて、波のうちあげない場合もふ

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科
 ** 正会員 工修 日本大学理工学部土木工学科
 *** 正会員 工修 飛鳥建設(株)

くまれているので、それに関してはビデオに記録をしなかった。

その実験状況を簡単に示したものが図-3で、そのビデオの若干の記録を示したものが、写真-1~3である。

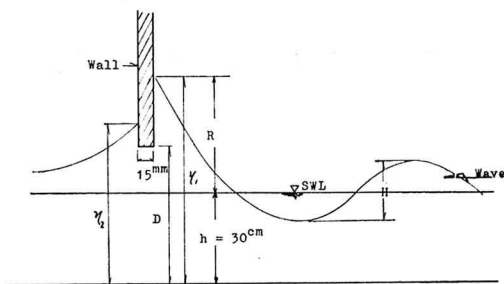


図-3 実験状況

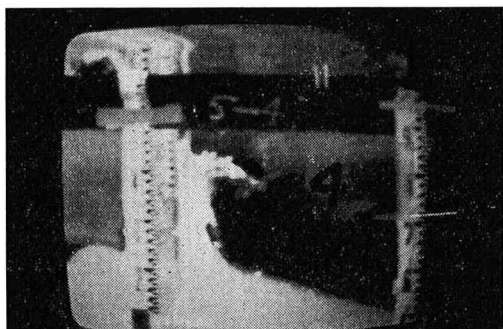


写真-1 実験記録 (1)

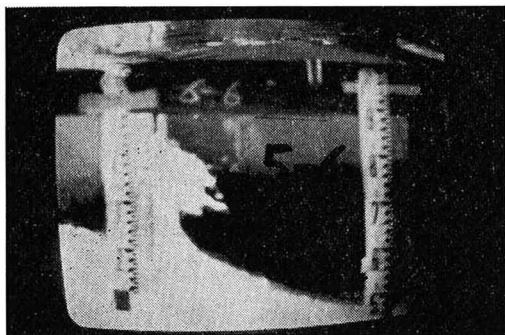


写真-2 実験記録 (2)

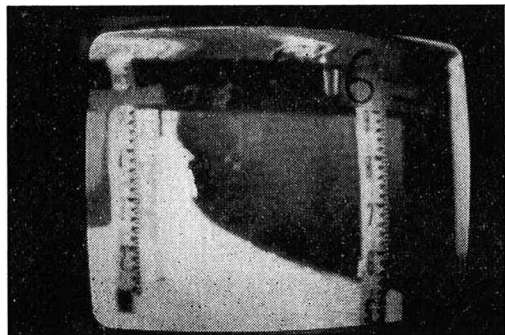


写真-3 実験記録 (3)

3. 実験結果

この実験から得られたデータは、収録したビデオテープを室内にてモニターテレビで再生し、各実験に対する波について、スローモーションとストップ装置を使用して入射波、遮蔽板への上昇などの状態を一波ごとに、1回の実験につき約10波ずつ読み取り平均した値を解析した。

また、別に波のうちあげ時の遮蔽板前面の波形をしるために、モニターテレビの画像をストップにして、35mm写真に撮影し、それから最大うちあげ波 R_{max} 、波のうちあげの現象などを解析した。ただし、「しぶき」と見なされるものはうちあげ高から除外した。

(1) 固定壁面前のうちあげ高について

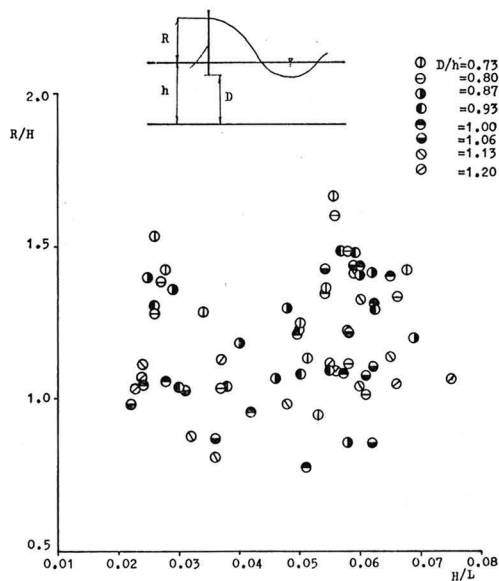


図-4 R/H と H/L の関係

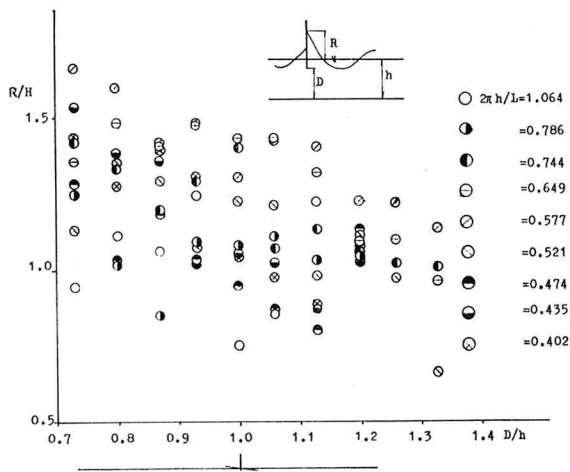


図-5 R/H と D/h の関係

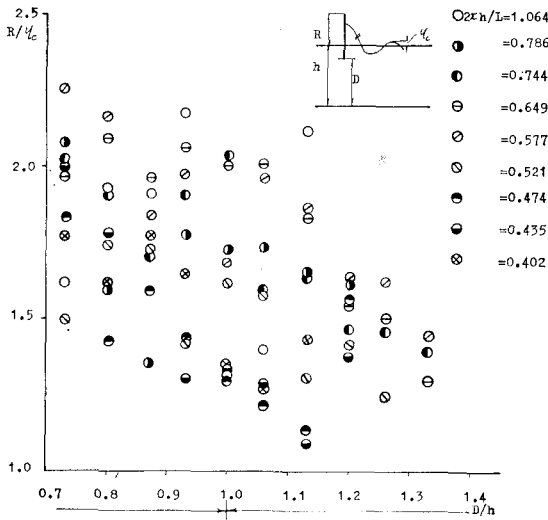
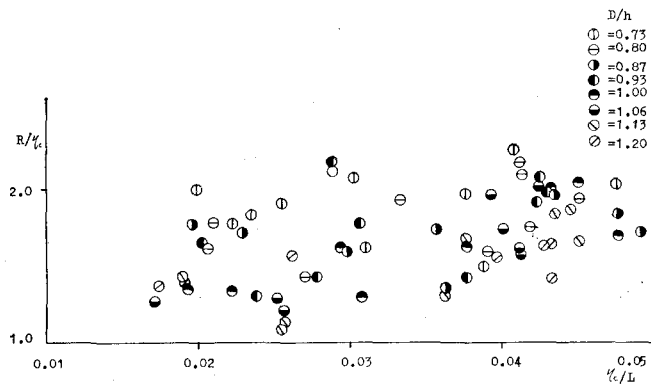
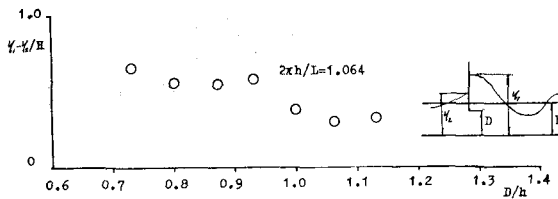
図-6 R/η_0 と D/h の関係図-7 R/η_0 と η_0/L の関係

図-8 (a)

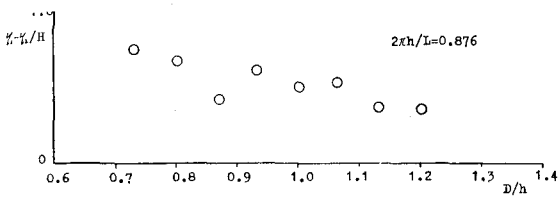


図-8 (b)

実験結果は図-4に、固定壁への波のうちあげ高 R/H と波形勾配 H/L の関係について、水路の底から壁の先端までの距離 D と水深 h の比 D/h を $2\pi h/L$ をパラメーターにして示したものである。また、図-5に壁へのうちあげ高 R/H と水深に対する壁の位置を示す D/h の関係について、相対水深 $2\pi h/L$ を用いて示した。

この結果から見ると、バラツキはあるが、同じ $2\pi h/L$ に関して D/h が小さい場合から1に増大するとともに R/H が小さくなり、1からさらに増大しても、 R/H があまり変化しないようである。いいかえると、遮蔽板が静水面以下に入ると、うちあげ高は大きくなるが、遮蔽板が静水面以上であると、うちあげ高があまり変わらないことになる。図-6も同じく遮蔽板直前の入射波の波峯位に関する η_0 とうちあげ高 R の比 R/η_0 と D/h に関して、 $2\pi h/L$ をパラメーターにして実験結果を示したものであるが、遮蔽板の下端が静水面以上にある場合と、静水面以下にある場合とで、若干、 R/η_0 と D/h に

対する関係が相違するようであり、 D/h が大きくなっても、かならずしもうちあげに関する R/η_0 が小さくならないようである。これらは、もちろん実験値のバラツキもあるが、波の峯の中に少しでも板の下端がはいっていると、うちあげを生じ、その板のはいっている深さがあまり大きくないほうが、うちあげる水の量が少なく、かえってうちあげ高を大きくするというような考え方が成立するのではないと思われる。これらの考え方を後述の式に導入するものとした。

うちあげ高に関しては、従来の水底まで達した鉛直壁面によるものよりはかなり小さく、本実験の範囲では、図-7のとおりで、 R/η_0 が1.1~2.2の間に生じた。ただし前述のように空気をふくみ飛沫となる「しぶき」は写真解析の際に除外した。

(2) 遮蔽板の前後面の波峯位について

図-8(a)~(i)は、板の前面のうちあげ高に達した場合の水底からの高さ η_1 とその厚さ1.5cmの板の背面における水位 η_2 との差に関する実験結果を示したものである。 $2\pi h/L$ をパラメーターとして示したが、いずれも遮蔽板が深くなるほど、 $(\eta_1 - \eta_2)/H$ は小さくなる。この場合に関してもなお若干ではあるが、板が静水面以下に達した場合とそれ以上の場合とでは、差が認められる。また、本実験では水深を30cmで一定にしたので、 $2\pi h/L$ の大きい、波長の小さいものほど、その $\eta_1 - \eta_2$ が小さい。これらが遮蔽効果であるが、本論では板の前面のうちあげ高を主として述べることにした。また、実験中、そのうちあげに際して、板がその峯の部分を集積するようにして、上昇する様子が見られたので、このこ

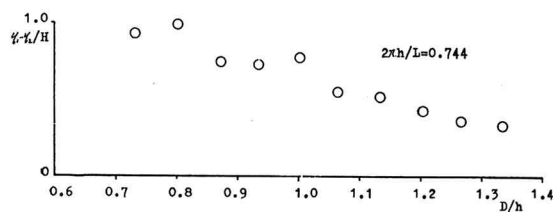


図-8 (c)

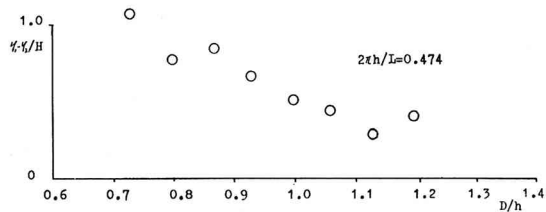


図-8 (g)

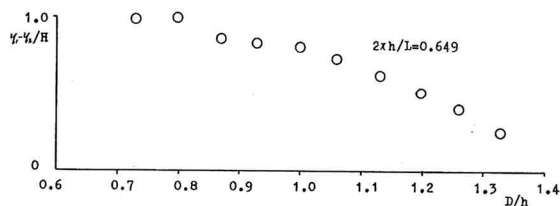


図-8 (d)

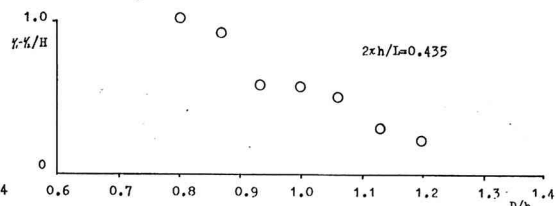


図-8 (h)

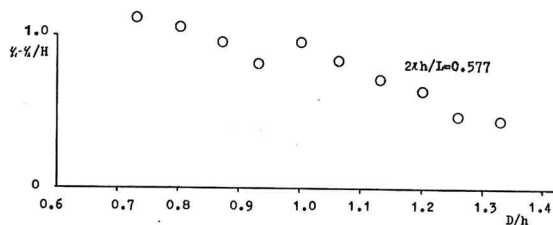


図-8 (e)

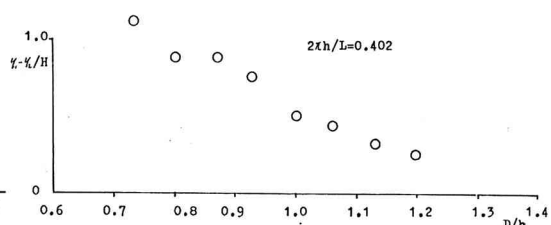


図-8 (i)

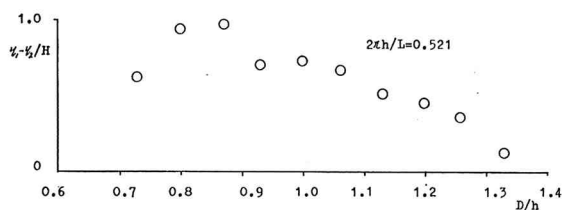


図-8 (f)

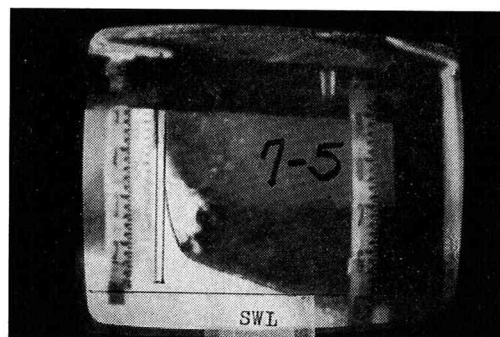


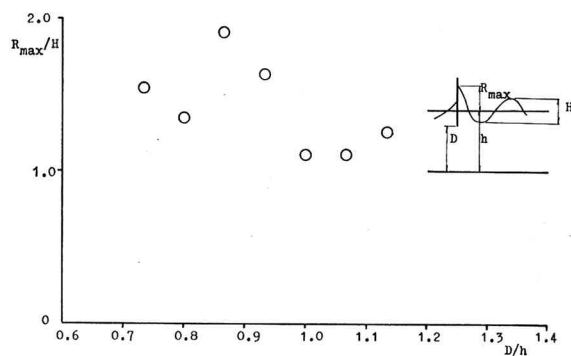
写真-4 実験記録 (4)

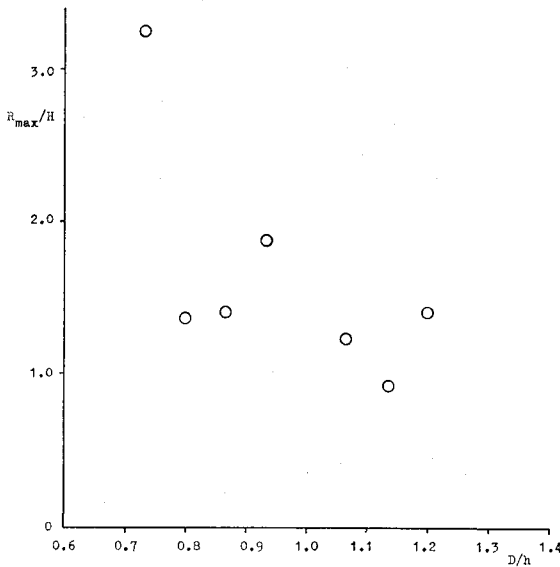
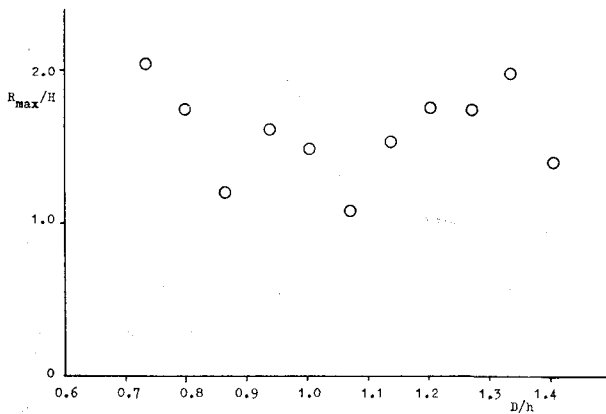
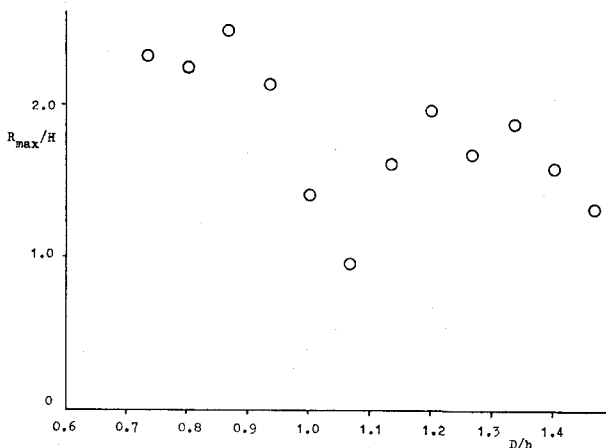
とも次の解析の式の中に導入することにした。

以上は、定性的にその平均値によって取りまとめたものである。

(3) 写真より読み取った波のうちあげ高について

ビデオテープに収録された個々の実験において、遮蔽板前面の波のうちあげ高が最大の状態になったと思われるところの映像をストップさせ、それを 35mm フィルムで写真撮影し、その写真から波のうちあげる水面の曲線を、たとえば 写真-4 のように推定し、水面曲線外にある部分については、波の飛沫あるいは板から飛び返る波の一部として除外し、波の最大うちあげ高 $R_{\max}$ とした。ここに、この $R_{\max}$ などの値を定量的に解析するのが本研究の目的である。いま、波高 H 、板の位置に関して、水路の底から壁の先端までの距離 D 、水深 h 、波長 L (計算による) を用い

図-9 $2\pi h/L=1.064$


 図-10 $2\pi h/L=0.786$

 図-11 $2\pi h/L=0.744$

 図-12 $2\pi h/L=0.649$

て、 $R_{\max}/H$, D/h の関係を $2\pi h/L$ に関して図示すると、図-9~17 のようになった。その結果から前述のように、遮蔽板を静水面付近の位置まで下げると、うちあげ高 $R_{\max}/H$ が最小になっている。これは明らかに静水面より深くまで板を下げるとうちあげ高は大きくなるが、静水面より浅いとうちあげる水の量が少なくなり、同じうちあげの力に対して、水の量の少ない方が高くうちあげられることになるからであろう。ここに、あるうちあげ量に関する仮想幅 B_D を導入することにした。

また、本研究は、特に遮蔽板が静水面以上にある場合の研究にとどめたが、静水面以下にある場合については、すでに研究がなされているので、これを省略することにした。次に用いた実験結果は、この写真から読み取った値に関するものである。

4. 静水面以上の波のうちあげに関する理論的考察

進行波が浅水域に入ると、その波峯位は、波をトロコイド波の形で示すと、Saintflou が示すように⁴⁾、

$$\eta_0 = \frac{H}{2} + \frac{\pi H^2}{4} \coth \frac{2\pi h}{L} \quad \dots\dots (1)$$

になる。ゆえにうちあげ高 $R_{\max}$ は、 η_0 より大きくなる。そこで

$$R_{\max} - \eta_0 = R \quad \dots\dots (2)$$

とおく。

次に静水面より

$$\frac{\pi H^2}{4L} \coth \frac{2\pi h}{L}$$

上の水面を x 軸に、それより鉛直上向きに y 軸をとり、図-18 のように示す。ここに、簡単に波形を

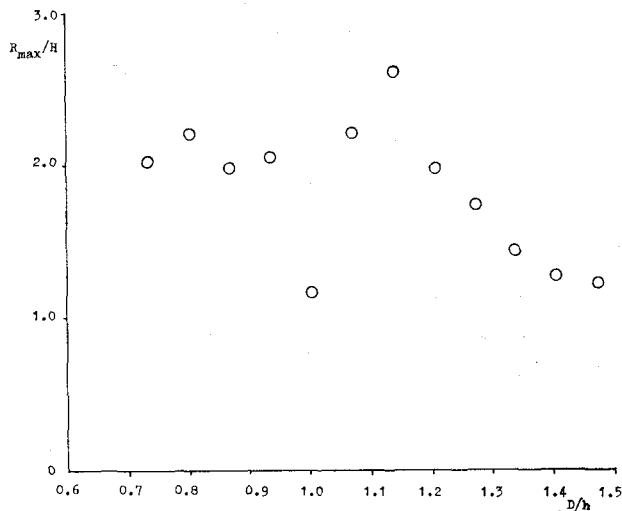
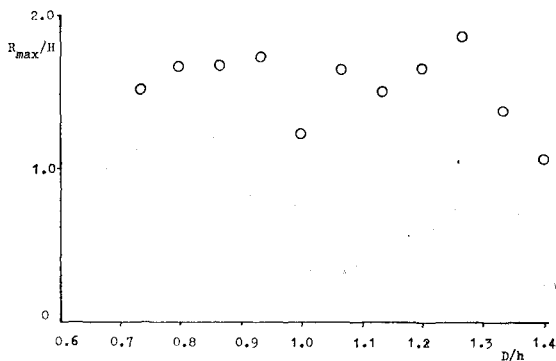
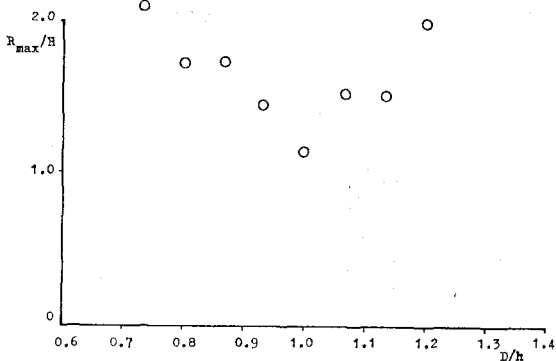
$$y = \frac{H}{2} \cos \frac{2\pi}{L} x \quad \dots\dots (3)$$

とする。この x と $x+dx$ の間の位置のエネルギー dE_p を圧力の形で示し、

$$dE_p = \frac{1}{2} w_0 \left\{ y - \left(\frac{H}{2} - d \right)^2 \right\} dx$$

とする。ここに、前に述べたように、実験から遮蔽板が前面の水をかき集めるように遮蔽することが明らかであるから、図-18 の x_0 の間について積分すると、

$$\begin{aligned} E_p &= \int_0^{x_0} \frac{1}{2} w_0 \left\{ y - \left(\frac{H}{2} - d \right)^2 \right\} dx \\ &= -\frac{w_0 H^2 L}{8\pi} \left\{ \frac{1}{4} C_p + \frac{1}{8} \sin 2C_p \right\} \end{aligned}$$

図-13 $2\pi h/L=0.577$ 図-14 $2\pi h/L=0.521$ 図-15 $2\pi h/L=0.474$

$$-\left(1 - \frac{2d}{H}\right) \sin C_p + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2d}{H}\right)^2 C_p \dots (4)$$

となる。ただし、 $C_p = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2d}{H}\right)$ とおく。

次に、水の粒子を円運動としてその速度を

$$\frac{TH}{\pi} = \text{const.}$$

とし、 dx の間の運動エネルギーを

$$dE_k = \frac{w_0}{2g} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 dx dy$$

とすると、

$$\begin{aligned} E_k &= \iint \frac{w_0}{2g} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 dx dy \\ &= \frac{w_0}{2g} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \left\{ \frac{HL}{4\pi} \sin x_0 \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{H}{2} - d \right) x_0 \right\} \end{aligned}$$

となる。ただし、

$$x_0 = \frac{L}{2\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{2d}{H} \right) = \frac{L}{2\pi} C_p$$

また、波長 L は、

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

であるから、

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{w_0 H^3}{16} \tanh \frac{2\pi h}{L} \\ &\quad \times \left\{ \sin C_p - \left(1 - \frac{2d}{H} \right) C_p \right\} \dots (5) \end{aligned}$$

になる。これが、仮想幅 B_D で、遮蔽板の下端から R_D までうちあげる場合の位置エネルギーになるとし、これを圧力の形で示すと、

$$\begin{aligned} E_p + E_k &= \frac{1}{2} w_0 \left\{ R - \left(\frac{H}{2} - d \right) \right\}^2 B_D \\ &= \frac{1}{2} w_0 R_D^2 B_D \dots (6) \end{aligned}$$

となり、仮想幅

$$B_D = \frac{2(E_p + E_k)}{w_0 R_D^2} \dots (7)$$

で示される。

ここで、 B_D は前述のように遮蔽板による波峯付近のエネルギーの集積に関連するとすれば、

$$B_D = k x_0 = k \frac{L}{2\pi} C_p \dots (8)$$

とすると、式 (7) は、

$$k \frac{L}{2\pi} C_p = \frac{2(E_p + E_k)}{w_0 R_D^2}$$

となり、したがって、

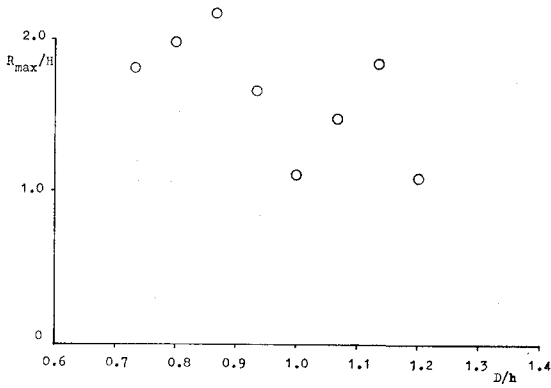
$$R_D = 2 \sqrt{\frac{\pi(E_p + E_k)}{k w_0 L C_p}} \dots (9)$$

になる。

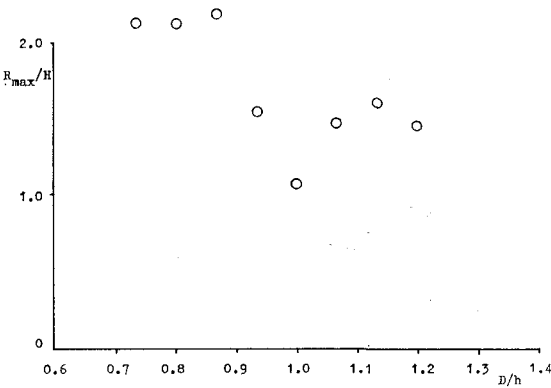
ここに、式 (2) を用いると、静水面以上の波のうちあげ高 $R_{\max}$ は、

$$R_{\max} = R_D + \frac{\pi H^2}{4L} \coth \frac{2\pi h}{L} \dots (10)$$

で、遮蔽によるうちあげ高が求められることになる。ゆえに、



図—16 $2\pi h/L=0.435$

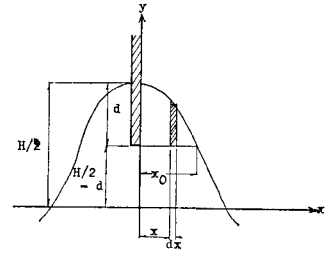


図—17 $2\pi h/L=0.402$

$$1/\sqrt{2k} = K$$

とおくと。

$$R_{\max} = KH \left[\frac{1}{4} \left\{ 1 + \frac{\left(1 - \frac{2d}{H}\right) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2d}{H}\right)^2}}{C_p} \right\} + \left\{ \left(\frac{\pi H}{2L} \right) \tanh \frac{2\pi h}{L} - \left(1 - \frac{2d}{H}\right) \right\} \right]$$



図—18 波のうちあげ量について

$$\times \left\{ \frac{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{2d}{H}\right)^2}}{C_p} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2d}{H}\right) \right\}^{1/2} + \frac{\pi H^2}{4L} \coth \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots (11)$$

となる。ただし、

$$C_p = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2d}{H}\right)$$

である。

ここに、式(11)に関して、前述の模型実験を用いて、 K の値を求めると、表—1のとおりになる。実験の結果には、かなりの誤差とバラツキが介入するので、式(11)を忠実に示す結果は期しにくい、その係数 K を

$$K \doteq \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 (=2.4649)$$

とおくと、かなりきれいまとめることができよう。また、板の下端における下流側の幅を写真から求め B_{model} とした値と、うちあげの仮想幅 B_D との比を求めた結果、ほぼ $1/2\pi (\doteq 0.1591)$ に近い値を得た。これらに関する理論的根拠は、いまのところ見出されていない。

5. む す び

固定した板を波の峯から波底に達しない程度に下げて

表—1 理論計算による B_D と K の値について

No.	d (m)	H (m)	L (m)	E_p ($\times 10^{-4}$)	E_k ($\times 10^{-4}$)	R_{model} (m)	B_D ($\times 10^{-2}$)	B_{model} (m)	h ($\times 10^{-1}$)	K	B_D/B_{model} ($\times 10^{-1}$)
6-1	1.65	0.113	4.68	0.42	0.05	0.170	0.32	0.30	0.739	3.679	0.106
6-2	2.85	0.137	4.33	1.39	0.17	0.180	0.96	0.15	0.213	2.871	0.640
6-3	3.20	0.144	3.97	1.67	0.23	0.180	1.17	0.15	1.373	2.699	0.780
6-4	5.30	0.186	3.61	4.62	0.79	0.240	1.88	0.15	1.704	2.423	1.253
6-5	5.60	0.192	3.26	4.76	0.89	0.460	0.54	0.20	0.954	3.238	0.270
6-6	4.75	0.175	2.90	2.97	0.74	0.240	1.28	0.22	1.590	2.508	0.581
6-7	4.30	0.166	2.53	2.06	0.65	0.214	1.18	0.13	1.656	2.457	0.907
6-8	2.45	0.129	2.15	0.46	0.21	0.080	2.09	0.10	2.595	1.963	2.090
6-9	0.40	0.088	1.77	0.01	0.01	0.070	0.08	0.10	0.813	3.502	0.080
7-1	3.20	0.104	4.68	2.31	0.13	0.115	3.67	0.20	2.046	2.211	1.835
7-2	4.80	0.136	4.33	5.18	0.37	0.180	3.42	0.25	1.974	2.251	1.368
7-3	5.15	0.143	3.97	5.52	0.48	0.200	3.00	0.20	1.920	2.282	1.500
7-4	7.65	0.193	3.61	11.66	1.50	0.300	2.92	0.30	1.931	2.276	0.974
7-5	6.80	0.176	3.26	7.99	1.19	0.370	1.34	0.12	1.386	2.686	1.116
7-6	6.60	0.172	2.90	6.74	1.15	0.145	2.50	0.20	3.486	1.694	1.250
7-7	5.70	0.154	2.53	4.39	0.89	0.145	4.99	0.25	3.077	1.803	1.996
7-8	4.70	0.134	2.15	2.45	0.61	0.145	2.90	0.18	2.584	1.967	1.611
7-9	3.45	0.109	1.77	1.03	0.46	0.100	2.96	0.15	2.963	1.837	1.973

波を遮蔽した場合の板面の波のうちあげ高について模型実験を行ない、特に波の峯付近におけるうちあげ高についての理論的解析をした結果、次のようなことが明白になった。

(1) まず平均的に、板の下端を峯から静水面以上においた場合と、静水面より下においた場合とで、板前面のうちあげ高と波高との比 (R/H) の変化が若干相違する。

(2) 少しでも波が板にとどくとならず波のうちあげを生ずる。

(3) 波形勾配が大きくなると R/H が大きくなるが、板の下端が上位にあると波形勾配の影響が小さくなり、一様に近づく。

(4) 板前面の波がそれに集積するようにしてうちあげる。

(5) うちあげ高は、それをうちあげる水の量に支配される。

(6) 波の遮蔽効果は、板を下げれば下げるほど大きくなる。

(7) 波を1こまずつ解析すると、板の下端の高さ D と水深 h との比 (D/h) が 1.1~1.2 ぐらいで、うちあげ高が急に大きくなることが多い。

(8) うちあげ高を支配する水の量を示すための仮想幅 B_D を導入して、エネルギー式からうちあげ高を示すことができるように思われる。

(9) 仮想幅を板下端の波の上流の幅に比例するとおいたエネルギー式から、係数として、

$$K \doteq \left(\frac{\pi}{2} \right)^2$$

という結果が得られた。

(10) 写真による板下端の幅と理論計算による仮想幅との比は、

$$\frac{(\text{仮想幅})}{(\text{実験による幅})} \doteq \frac{1}{2\pi}$$

とせられる。

(11) これらより、ほぼこの考え方が正しいとすると、静水面以上の動圧および静水圧に対する考え方が肯定され、波圧力に関する手がかりを得ることができる。

このほかさらに実験研究を重ねて、上記の研究結果を裏づけ、式を吟味簡略化して、実用式に改めたいと考えている。最後に、本実験にあたり、前日本大学大学院生の石黒久君をはじめ、大学院生 小池一臣、植木隆彦、中川英孝の諸君の助力を得たのでここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Ursell, F.: The Effect of a Vertical Barrier on Surface Waves in Deep Water, Proc. Cambridge Phil. Soc., Vol. 43, Part 3, July, 1947.
- 2) Wiegel R.L.: Transmission of Waves Past a Rigid Vertical Thin Barrier, J. Waterways Harbours Div., Proc. ASCE, Vol. 86, WWI, March, 1960.
- 3) 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, 第3巻1号, 1964年4月
- 4) 土木学会: 海岸保全施設設計便覧, 昭和44年改訂版, p. 41.