

波峯付近における波圧に関する実験的研究

久宝雅史*・竹沢三雄**・植木隆彦***

1. 概 説

海洋における浮構造物、カーテン防波堤¹⁾などのように水面に関する波の挙動に関係の大きい構造物の設計にあたって、波峯付近の波圧²⁾を推算する必要が生ずる。この考察は前回³⁾の「静水面以上を鉛直固定板で遮蔽した場合の波のうちあげ高に関する小型実験を行ない、若干の考察」を試みたものに続いて、新たに「波峯付近における波圧を求めるために行なった小型実験による考察」である。ここに小型実験とは、いわゆる模型実験用水槽を用いた周期 1.0~2.6 sec、水深 40 cm、波高 1~31 cm の室内水槽長さ 156 m に関するものである。

前回の研究では、波を規則波として取扱い、

- a) 板の下端が静水面以上にある場合と静水面以下に達した場合とで、うちあげ高と波高との比の変化が若干相違する。
- b) 板の下端が波の峯近くでは波形勾配の影響が小さくなり、それに無関係になりやすい。
- c) うちあげ高は板にうちあげられる水の量に支配される。
- d) うちあげ高を支配する水量を示すために仮想幅を導入し、エネルギーの式からうちあげ高 R は次式で示される。

$$R = KH \left[\frac{1}{4} \left\{ 1 + \frac{n \sqrt{1-n^2}}{C_p} \right\} + \left\{ \frac{\pi H}{2L} \tanh \frac{2\pi h}{L} - n \right\} \left\{ \frac{\sqrt{1-n^2}}{C_p} - \frac{1}{2}n \right\} \right]^{1/2} + \frac{nH}{2} + \frac{\pi H^2}{4L} \coth \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $n=1-2d/H$
 $C_p=\cos^{-1}(1-2d/H)$

R : うちあげ高
 H : 入射波高
 L : 波長
 h : 水深
 d : 波の峯から板下端までの鉛直距離

そして式 (1) の係数 K について小型実験で検討し、若干のばらつきはあるが、ほぼ一定であるという結果を

得た。

この考察では、前回と同じ実験水槽を用いたが、しかし今回は固定板を用いて波圧を測定したこと、連続 100 波以上の波を観測して、その最も生起回数の多い波に関するうちあげ高、波圧を求めたことが前回と違っている。

こうして、一連の実験でその最も多く生じた波に関して、式 (1) を検討してその係数 K を推定した。

次に波の峯付近を遮蔽した場合のうちあげ高と、その板の圧力との関係を求めた結果、波の峯の圧力がうちあげ高をもって示すことが明白になった。したがって、式 (1) の係数 K が一定ならば、そのうちあげ高によって波の峯の付近の圧力が求められることになるわけである。この考察はこの実験状況と、その結果を示したものである。

2. 実 験

(1) 実験設備

実験設備は前回の場合と同じく技研興業株式会社の水槽を借用したものである。その概要は長さ 156 m、幅 140 cm、高さ 150 cm の大型造波水槽で一端にフラッター式造波装置を、他端にパイプ式消波装置を設けてある。そして観測部分における底勾配は前回と同様に 1:30 の砂利床である。

今回の実験における波のうちあげ高および波力の測定は図-1 に示す鋼製の測定装置を作製し、これを造波端より約 150 m の位置に取り付けた。そしてこの測定装置はアームと固定板を 4 本のボルトにて締結し、またア

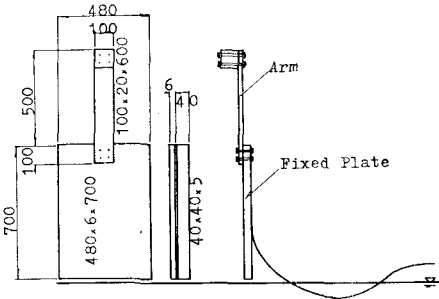


図-1 実験装置 (単位 mm)

* 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 鹿島建設株式会社

ームと固定台も同様に4本のボルトで締結してある。ただし固定台は上下可動の構造である。

入射波高 (H) と固定板への波のうちあげ高 (R) の測定は、固定板より沖側 1.2m と固定板の位置にそれぞれスタフを設け、前回と同様にビデオテープレコーダーにて観測記録した。波力 (P) の測定は 図-3 に示すように、固定板に取り付けたアームの2点A, Bのそれぞれ裏表にストレインゲージを張り付けブリッジ回路を構成し、この2点 A, Bに生じるゲージの抵抗変化からA, Bの曲げモーメントの差を動ひずみ記録増幅器にてビジュグラフに自記させ波力を算出した⁴⁾。

実験は水深を一定 ($h=40$ cm) にし、周期 $T=1.0\sim 2.6$ sec で 0.2sec ごとに变化させ、計9種類の波について入射波高 (H)、波のうちあげ高 (R)、固定板に働く波力 (P) の測定を行なった。また固定板の下端は静水面に平行で波の進行方向に対して直角とし、静水面上 10cm の位置から 2.5cm の間隔で静水面の位置まで下げ、各周期の波に対する測定をしている。

波の測定記録は結果のばらつきを考え、約100波以上の連続波についてビデオテープおよびビジュグラフにおのおの実験について記録させ、その解析を行なった。図

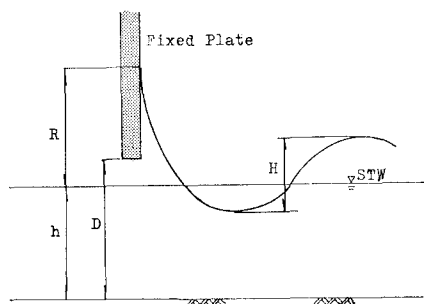


図-2 実験状況

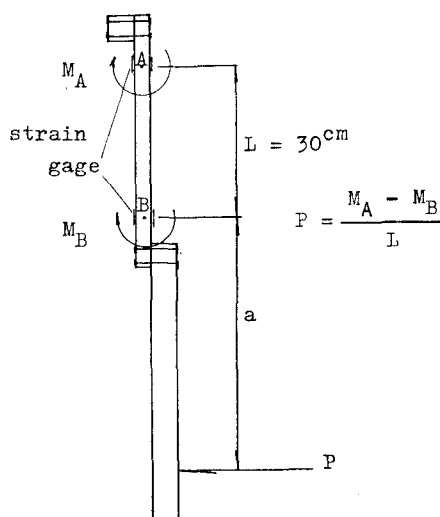


図-3 波力測定法

—2 は実験状況の概略を示したもので、 R は波のうちあげ高、 H は入射波高、 h は水深、 D は水底から固定板下端までの鉛直高さである。

(2) 実験結果

各実験の入射波高 (H)、固定板のうちあげ高 (R) および波力 (P) をビデオテープの再生およびビジュグラフからそれぞれ約100波を読み取り各測定記録を頻度グラフでまとめ、各データの代表値を表-1のように示した。

いま、かりに最多頻度の波高 H_{most} 、波のうちあげ高 R_{most} 、波力 P_{most} の間には、当然一義的関連があるものとした。それらについて (R/H) と (H/L) 、 (D/h) の関係および $P/w_0BH\left\{\eta - \left(\frac{H}{2} - d\right)\right\}$ と (H/L) 、 (D/h) の関係を示すと 図-4, 5, 6, 7 のようになる。ただし、 η は静水面から波の峯までの高さである。

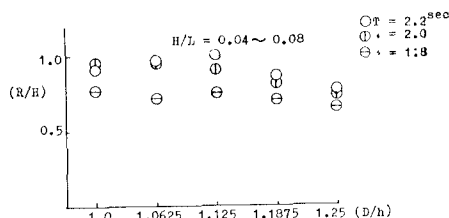


図-4 R/H と D/h の関係

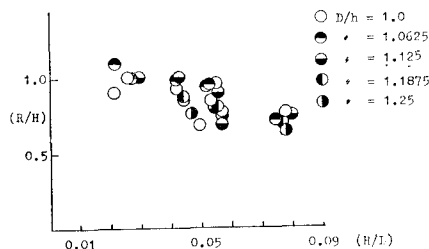


図-5 R/H と H/L の関係

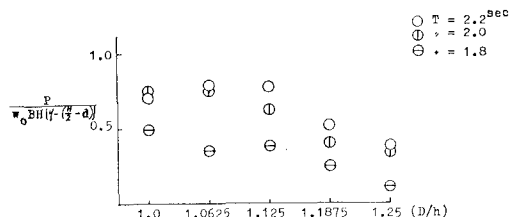


図-6 波力 P と D/h の関係

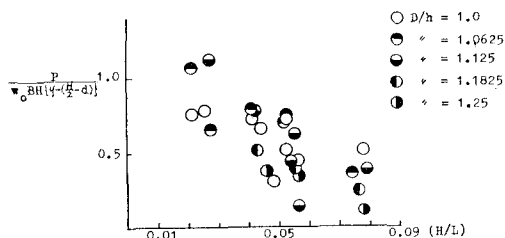


図-7 波力 P と H/L の関係

表-1 各実験の代表値

实 验 番 号		I				II				III				IV				V			
D/h		1.0000				1.0625				1.1250				1.1875				1.2500			
周期 (sec)	(H) (R) (P)	最大	最多	平均	最小	最大	最多	平均	最小	最大	最多	平均	最小	最大	最多	平均	最小	最大	最多	平均	最小
1	H (cm)	17.0	10.5	11.4	6.0	15.0	10.5	10.1	4.0												
	R (cm)	16.0	9.5	10.9	5.0	16.0	11.5	11.9	6.0												
	P (g/cm)	70.0	45.0	35.3	5.0	80.0	35.0	35.6	5.0												
2	H	16.0	11.5	11.8	7.0	17.0	12.5	12.0	7.0	18.0	12.5	11.5	6.0								
	R	16.0	11.5	11.9	8.0	17.0	12.5	12.5	8.0	16.0	12.5	11.6	7.0								
	P	80.0	55.0	45.5	5.0	90.0	35.0	44.3	5.0	90.0	25.0	43.6	5.0								
3	H	22.0	17.0	16.5	12.0	23.0	17.0	17.1	12.0	25.0	17.5	17.8	12.0	29.0	18.0	19.1	9.0	26.0	19.0	19.7	13.0
	R	20.0	15.5	15.3	11.0	23.0	16.5	17.1	10.0	22.0	17.5	17.2	12.0	20.0	15.5	14.9	7.0	19.0	14.5	13.5	10.0
	P	160.0	115.0	104.6	40.0	140.0	95.0	95.5	50.0	120.0	65.0	65.1	20.0	80.0	25.0	34.5	5.0	60.0	10.0	24.3	5.0
4	H	26.0	19.5	19.9	15.0	26.0	19.5	19.3	14.0	25.0	20.5	20.1	12.0	29.0	20.5	20.7	10.0	28.0	21.0	21.5	15.0
	R	23.0	18.5	18.6	15.0	25.0	18.5	19.5	13.0	25.0	18.5	18.4	13.0	23.0	16.5	16.8	10.0	22.0	15.5	15.3	10.0
	P	190.0	155.0	154.5	110.0	180.0	125.0	125.3	70.0	150.0	85.0	94.5	40.0	100.0	35.0	44.8	5.0	80.0	15.0	34.0	5.0
5	H	31.0	25.5	28.1	21.0	31.0	24.5	23.9	19.0	32.0	26.0	26.1	20.0	31.0	25.0	24.3	15.0	33.0	25.5	26.1	19.1
	R	25.0	19.5	18.9	13.0	25.0	17.5	17.1	13.0	25.0	19.5	19.5	12.0	23.0	17.5	17.2	12.0	23.0	16.5	16.6	10.0
	P	240.0	195.0	194.7	150.0	180.0	105.0	114.0	60.0	160.0	105.0	105.0	60.0	110.0	45.0	53.7	5.0	100.0	15.0	43.5	5.0
6	H	19.0	15.0	14.7	10.0	20.0	14.5	14.2	8.0	23.0	15.5	15.2	9.0								
	R	17.0	12.5	13.0	9.0	19.0	13.5	13.0	7.0	19.0	12.5	13.0	7.0								
	P	110.0	65.0	65.7	30.0	110.0	55.0	55.1	10.0	90.0	25.0	43.7	5.0								
7	H	18.0	13.5	13.5	9.0	19.0	13.5	12.5	8.0												
	R	14.0	10.5	9.9	5.0	13.0	9.5	8.7	5.0												
	P	90.0	45.0	44.9	5.0	50.0	5.0	22.8	5.0												
8	H	15.0	9.5	9.8	5.0																
	R	11.0	6.5	6.8	3.0																
	P	60.0	15.0	25.1	5.0																
9	H	11.0	6.5	6.0	1.0																
	R	10.0	5.5	6.2	3.0																
	P	60.0	15.0	24.4	5.0																

3. 波のうちあげ高と波圧について

この実験結果から造波機の特성에関連して、特に $T=1.8, 2.0, 2.2$ sec の波に対する測定値について波のうちあげ高と波圧について検討する。ただし各測定値には読取り誤差 ± 0.5 cm が含まれている。

(1) 係数 K の値について

前回の研究で波のもつエネルギーから求めた波のうちあげ高 R の式(1)の係数 K の値について、今回の実験における測定値から推算すると表—2 のようになり、ほぼ一定になる。ただし、ここで前回の実験から求められた K の値 ($K \div 2.465$) と比較すると今回の実験による値は多少小さい値になった。これは前回の実験においては板前面の波のうちあげ高の最大の状態を写真から推定し、平均波高、最大うちあげ高を用いたことによるものと思われる。したがって、前は $K=2.465$ であったが今回は $K=1.231$ となった。

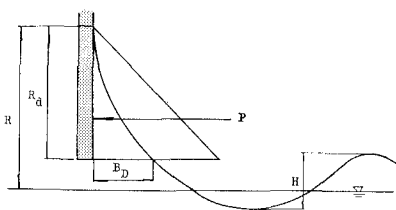
表—2 うちあげ高による K の値

実験番号	H_{most} (cm)	R_{most} (cm)	K
I-3	17.0	15.5	1.565
I-4	19.5	18.5	1.155
I-5	25.5	19.5	1.185
II-3	17.0	16.5	1.705
II-4	19.5	18.5	1.382
II-5	24.5	17.5	1.102
III-3	17.5	17.5	1.650
III-4	20.5	18.5	1.429
III-5	26.0	19.5	1.175
IV-3	18.0	15.5	1.365
IV-4	20.5	16.5	1.221
IV-5	25.0	17.5	0.953
V-3	20.0	14.5	0.509
V-4	21.0	15.5	1.065
V-5	25.5	16.5	0.871
平均値			1.231

(2) 波圧によるうちあげ高と実測のうちあげ高

波力の測定記録 (P) は図—8 からあきらかなように、固定板の単位幅当りに作用する全波力であるから、いま固定板下端からの波のうちあげ高を R_d として固定板に作用する全波力 P が

$$P = \frac{1}{2} w_0 R_d^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$



図—8 固定板に作用する水平波力

で表現できるかどうかを検討してみよう。式 (2) から

$$R_d = \left(\frac{2P}{w_0} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、静水面からのうちあげ高 R' は

$$\begin{aligned} R' &= R_d + \Delta\eta + \left(\frac{H}{2} - d \right) \\ &= \left(\frac{2P}{w_0} \right)^{1/2} + \frac{\pi H^2}{4L} \tanh \frac{2\pi h}{L} + \left(\frac{H}{2} - d \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

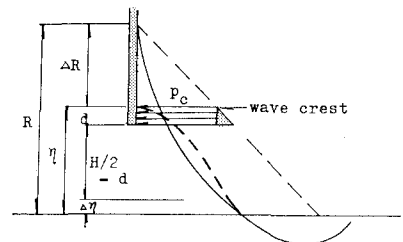
で与えられる。ただし、 w_0 は水の単位体積重量、 $\Delta\eta$ は波の軌道中心上昇高、 d は波の峯から板下端までの高さである。したがって式 (4) より各実験結果 (表—1) の最多頻度の波力 P_{most} から計算した波のうちあげ高 R'_{most} と実測による波のうちあげ高の最多頻度 R_{most} を比較すると表—3 のようになる。この表よりあきらかなように R'_{most} と R_{most} がほぼ等しい値をもつ、ゆえに波のうちあげ高が全波力を示すものと考えてよいことになる。

表—3 波力とうちあげ高

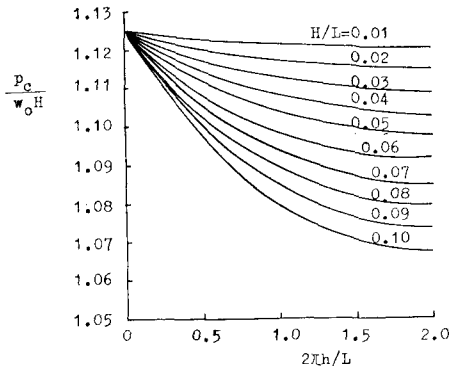
実験番号	P_{most} (g/cm)	計算による R'_{most} (cm)	実測による R_{most} (cm)
I-3	115.0	16.0	15.5
I-4	155.0	19.0	18.5
I-5	195.0	22.2	19.5
II-3	95.0	19.3	16.5
II-4	125.0	17.7	18.5
II-5	105.0	18.5	17.5
III-3	65.0	17.5	17.5
III-4	85.0	19.6	18.5
III-5	105.0	22.0	19.5
IV-3	25.0	15.7	15.5
IV-4	35.0	17.4	16.5
IV-5	45.0	19.3	17.5
V-3	10.0	14.6	14.5
V-4	15.0	17.1	15.5
V-5	15.0	17.9	16.5

(3) 波の峯付近の圧力分布について

進行波により固定板に作用する波圧を波のエネルギーによって生じるものとして、図—9 に示すように波圧に関連する波のうちあげ高を ΔR とすると、波の峯における波圧 p_c は ΔR による動水圧的な波圧と考えられる。したがって、固定板のない状態で波の峯における動水圧 p_c は式(1)から $d=0$ とおき



図—9 波の峯付近の波圧状況



図—10 波圧と比水深の関係

$$p_c = w_0 K H \left[\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\pi H}{2L} \tanh \frac{2\pi h}{L} - 1 \right\} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。図—10 は (H/L) をパラメーターとして $p_c/w_0 H$ と $2\pi h/L$ の関係を式(5)から求めたグラフである。ただし、 $K=1.3$ とする。

4. 結 論

前回と今回の2回の実験より、固定した板を波峯付近で遮蔽した場合の波のうちあげ高と波の峯付近の波圧分布について次のような結果が得られた。まず、うちあげ高に関しては図—4, 5 のように前回の実験と定性的にはまったく同じ結果が得られた。ただし、係数 K の値については前回の場合、平均波高と最大うちあげ高から求めたために今回の結果より多少大きくなった。今回の実験で得られた結果は次のとおりである。

- (1) 式(1)の係数 K は R_{most} に関して $1.2 \sim 1.4$ (平均 1.3) が妥当な値と推定される。

- (2) 図—6, 7 に示すように、固定板に作用する全波圧は波のうちあげ高で示されるものと思われる。

- (3) 波の峯 (半波高まで) の波の圧力は、静水圧および式(6)による動水圧で与えられる。

- (4) 動水圧は浅水域では波形勾配の影響は小さいが、深水域ではその影響が大きい。

こうして、式(1)で与えられる波のうちあげ高を算出し、その最高点以下を静水圧の三角形分布として、静水圧を考慮した波圧分と見なして、普通の波 (特に most frequent wave) の内蔵波圧を示すものとみても工学的には大きな誤りがないものと考えられる。また波の峯付近でもかなり大きな動的な波圧が作用することが明白になり、波の峯より半波高下までほぼ一様と考えてもよいであろう。こうして本研究結果から波の峯付近の波圧が推算できると、前に示したような水面付近を遮蔽する構造物の波の峯付近の外力がわかり、その構造設計が可能であると思われる。

なお、この実験を行なうにあたり協力を頂いた技研興業株式会社田中要三氏ならびに実験を手伝って下さった前日本大学大学院学生中川英孝、小池一臣両君をはじめ大学院学生藤田雄治君に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 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，1964，4。
- 2) Traetterg, A.: The effect of wave crests on wave forces, Proc. of Coastal Eng., 1970, 10.
- 3) 久宝雅史・竹沢三雄・中川善雄：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，第19回海岸工学講演会論文集，1972，11。
- 4) 1) と同じ。