

波峯付近の波圧分布について

久宝雅史*・竹沢三雄**

1. 概 説

海底に達する鉛直壁あるいは柱などの海岸構造物に作用する波圧公式については、すでに知られているように多くの算定式が設計に使用されているが¹⁾、海底に達しない透過性構造物に作用する波圧に関する研究は比較的少なく^{2),3)}、海底まで達している構造物に作用する波圧公式を準用している場合が多いため、かなり大きな設計波圧を考慮しているように思われる。

海岸構造物に作用する設計波圧分布は、静水面で最大となり、静水面を境に、静水面下では直線的に減少し、また静水面上でも波の上昇高まで直線的に減少するとされ、これらに関して多くの経験式あるいは実験式がある。

著者らは、波圧分布が最大になるとされている静水面から上方を鉛直壁で遮蔽し、鉛直壁に作用する波圧の作用範囲を波のうちあげ高までとして、静水面まで遮蔽した場合の鉛直壁に作用する波圧が、波のうちあげ高から静水面まで直線的に増加するものとして、三角形分布になるものと考えた。そして、先に報告したように^{4),5)}、鉛直壁に作用する全波圧と波のうちあげ高を模型実験から測定した結果、静水面上の波圧分布は、波のうちあげ高に関する三角形分布で十分表現できることが確かめられた。

そこで本論は、静水面から上方だけを鉛直壁で遮蔽した場合の波のうちあげに関する簡単な理論解析を行い、波のうちあげ高

$$R = \pi H \left(\frac{1}{4} + \frac{H}{L} \tanh \frac{2\pi h}{L} \right)$$

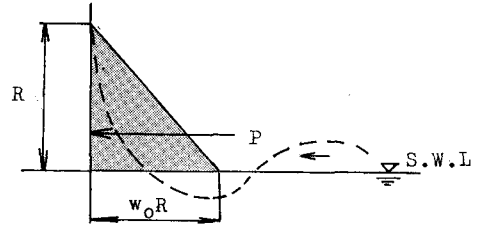
および、静水面における波圧

$$p_0 = w_0 R = \pi w_0 H \left(\frac{1}{4} + \frac{H}{L} \tanh \frac{2\pi h}{L} \right)$$

を誘導し、これらの理論式が実験値とかなりよく一致していることを同時に検討した。ただし、 R : 波のうちあげ高、 H : 波高、 L : 波長、 h : 水深、 p_0 : 静水面の波圧である。

2. 基本式

静水面より上方を鉛直壁で締切った場合、その鉛直壁



図—1 全波圧 P

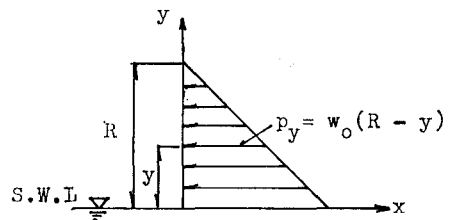
に作用する波圧は、波のうちあげ高 (R) の範囲まで影響するものとして、壁に作用する全波圧 P が図—1のように三角形分布からなりたっているものとする、この全波圧 P は

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

として表わすことができる。ただし、 w_0 : 水の単位体積重量、 R : 波のうちあげ高。このように考えるとすれば、鉛直壁の静水面上 y に作用する波圧 p_y は図—2に示すように、

$$p_y = w_0 (R - y) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられるものとする。



図—2 波圧分布

海底から直立している構造物への波のうちあげ高 R についてはすでに多くの研究が行われているが⁶⁾、本論では静水面から上方だけを鉛直壁で遮蔽した場合の波のうちあげ高 R について簡単な式から検討する。

まず、波のうちあげ高に関する基本的な考え方として、波の連続の条件と運動量の条件について、式 (3) および式 (4) のように与えてみる。すなわち

$$V_R = V_w \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$E_R = E_w \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

* 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 日本大学講師 理工学部土木工学科

V_R : 波のうちあげ高に関する量

V_w : うちあげ前に壁前面に貯えられている静水面上の波の量

E_R : 波のうちあげ高に関するエネルギー量

E_w : うちあげ前に壁前面に貯えられている静水面上の波のエネルギー量

いま, 図-3 に示すように, 単純に波形を規則的な正弦波

$$y = \frac{H}{2} \sin \frac{2\pi}{L} x \quad \dots\dots\dots (5)$$

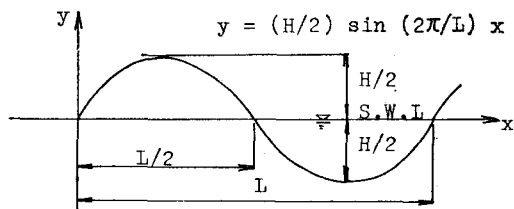


図-3 波 形

と仮定し, 一波長間に貯えられる静水面上の波の量とエネルギー量を求めると式 (6)~式 (10) のように表わされる。ただし, x 軸は静水面で波の進行方向を負とし, y 軸は鉛直壁面で, 鉛直上方を正の向きとする。

鉛直壁への波のうちあげが始まる前, 鉛直壁前面に貯えられている静水面上の水の量 V_w は, 単位幅当り,

$$\begin{aligned} V_w &= \int_0^{L/2} y dx \\ &= \int_0^{L/2} \frac{H}{2} \sin \frac{2\pi}{L} x dx \\ &= \frac{HL}{2\pi} \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

である。一方, 鉛直壁前面に貯えられている静水面上のエネルギー量 E_w は, その部分の位置エネルギー E_p と運動エネルギー E_k とからなり, それぞれ,

$$\begin{aligned} E_p &= \int_0^{L/2} \frac{1}{2} w_0 y^2 dy \\ &= \frac{w_0}{2} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \int_0^{L/2} \sin^2 \frac{2\pi}{L} x dx \\ &= \frac{w_0 H^2 L}{32} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

および

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{w_0}{2g} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \int_0^{L/2} y dx \\ &= \frac{w_0}{2g} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \int_0^{L/2} \left(\frac{H}{2} \right) \sin \frac{2\pi}{L} x dx \\ &= \frac{\pi w_0 H^3 L}{4g T^2} = \frac{w_0 H^3}{8} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

となる。ただし

$$L = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad \dots\dots\dots (9)$$

T : 周期, h : 水深, L : 波長

H : 波高, g : 重力加速度

w_0 : 水の単位体積重量。

したがって, 式 (7) と式 (8) から

$$\begin{aligned} E_w &= E_p + E_k \\ &= \frac{w_0 H^2 L}{32} + \frac{w_0 H^3}{8} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

となる。

次に, 鉛直壁への波のうちあげ高 R に関して, 式 (3) の連続の式を満足するために, 鉛直壁前面に貯えられている量が 図-4 に示すように, かりに三角形状で鉛直壁

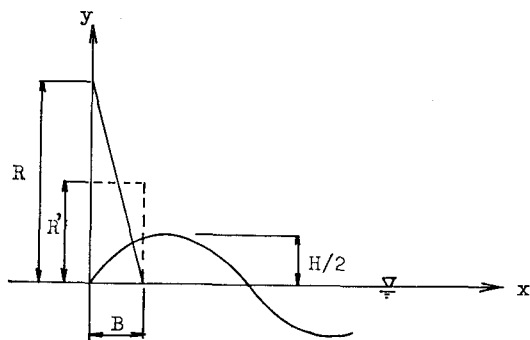


図-4 波のうちあげ図

へうちあがったとすると, 単位幅当りの量は,

$$V_R = \frac{1}{2} RB \quad \dots\dots\dots (11)$$

である。ただし, R は静水面からのうちあげ高, B はうちあげ断面を三角形に仮定した場合の静水面の位置における仮想されるうちあげ幅である。

また, 運動量の条件, 式 (4) の波のうちあげ高に関するエネルギー量 E_R は, 図-4 の点線で示すように長方形断面と仮定すると簡単に表わすことができ,

$$E_R = \frac{w_0}{2} (R')^2 B \quad \dots\dots\dots (12)$$

で与えられる。ただし, $R' = R/2$ と仮定する。

ここで, 式 (6), (10), (11), (12), の間に式 (3), (4) がなりたつとすると, まず, 式 (3) の連続の式から, 式 (6) と式 (11) が等しいから,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} RB &= \frac{HL}{2\pi} \\ \therefore \frac{R}{H} &= \frac{L}{\pi B} \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

となる。また, 式 (4) の運動量の式から, 式 (10) と式 (12) が等しくなり,

$$\begin{aligned} \frac{w_0}{2} (R')^2 B &= \frac{w_0 H^2 L}{32} + \frac{w_0 H^3}{8} \tanh \frac{2\pi h}{L} \\ \therefore \left(\frac{R'}{H} \right)^2 &= \frac{L}{4B} \left(\frac{1}{4} + \frac{H}{L} \tanh \frac{2\pi h}{L} \right) \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

となる。ここで前假定

$$R' = \frac{R}{2}$$

から、式 (14) は

$$\left(\frac{R'}{H}\right)^2 = \left(\frac{R}{2H}\right)^2 = \frac{L}{4B} \left(\frac{1}{4} + \frac{H}{L} \tanh \frac{2\pi h}{L}\right)$$

$$\therefore \left(\frac{R}{H}\right)^2 = \frac{L}{B} \left(\frac{1}{4} + \frac{H}{L} \tanh \frac{2\pi h}{L}\right) \quad \cdots \cdots (15)$$

と書き改められよう。また、式 (13) より

$$B = \frac{L}{\pi(R/H)} \quad \cdots \cdots (16)$$

であるから、式 (16) を式 (15) に代入して

$$\left(\frac{R}{H}\right)^2 = \pi \left(\frac{R}{H}\right) \left(\frac{1}{4} + \frac{H}{L} \tanh \frac{2\pi h}{L}\right)$$

となり、

$$\frac{R}{H} = \pi \left(\frac{1}{4} + \frac{H}{L} \tanh \frac{2\pi h}{L}\right) \quad \cdots \cdots (17)$$

が導かれる。

このようにして、静水面から上方を鉛直壁で遮蔽した場合の波のうちあげ高 (R/H) が与えられるならば、図—2 に示すような波圧分布から、静水面上の任意点の波圧 p_y を

$$p_y = w_0(R-y)$$

$$= w_0 \left\{ \pi H \left(\frac{1}{4} + \frac{H}{L} \tanh \frac{2\pi h}{L} \right) - y \right\} \quad \cdots \cdots (18)$$

と表わすものとする。したがって、式 (18) から、静水面の波圧 p_0 は、

$$p_0 = \pi w_0 H \left(\frac{1}{4} + \frac{H}{L} \tanh \frac{2\pi h}{L} \right) \quad \cdots \cdots (19)$$

となる。

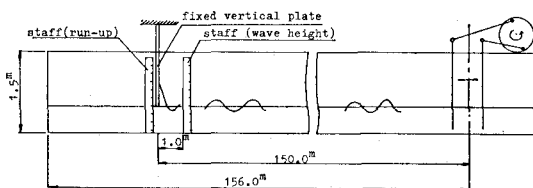
3. 実 験

(1) 実験概要

図—5 に概略図を示してあるが、その内容は次のとおりである。

実験水槽：長さ 156 m, 幅 140 cm, 高さ 150 cm で、
フラッター式造波装置とパイプ式消波装置からなっている。

水 深： $h=40$ cm (一定)



図—5 実験概要図

波 高： $H=6.5 \sim 28.0$ cm

周 期： $T=1.0 \sim 2.6$ sec

底 勾 配：1 : 30 の砂利床 (観測部分だけ)

鉛 直 板：400×700×6 mm の鋼板

波のうちあげ高測定：

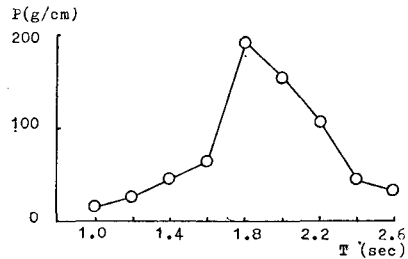
ビデオテープに録画し、スローモーション装置にてスタッフ目盛から読む。ただし、しぶきと思われるものは除外した。

波圧測定装置：

鋼板にとりつけた鋼製アーム (100×600×20 mm) の 2 点にストレンゲージをはりつけ、この 2 点間のモーメント差をビジュグラフに自記させる。

(2) 実験結果

鉛直固定板を静水面まで鉛直上方から下ろし、全波圧 P を前記の波圧測定装置で記録した結果、図—6 のとおりである。ただし、 P は平均的な値である。



図—6 固定板に作用する全波圧 P (g/cm)

いま、この測定した全波圧 P が式 (1) に示すように三角形分布をしているとすれば、静水面の波圧 p_0 は、

$$p_0 = w_0 R$$

$$= w_0 \pi H \left(\frac{1}{4} + \frac{H}{L} \tanh \frac{2\pi h}{L} \right)$$

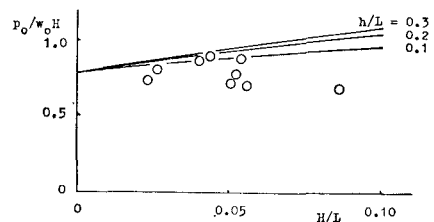
および

$$P = \frac{1}{2} w_0 R^2$$

ゆえに

$$p_0 = \sqrt{2w_0 P} \quad \cdots \cdots (20)$$

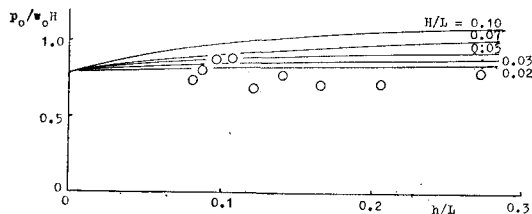
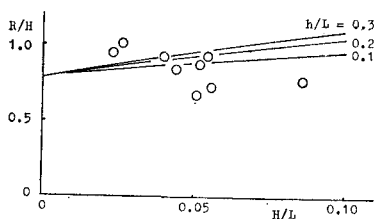
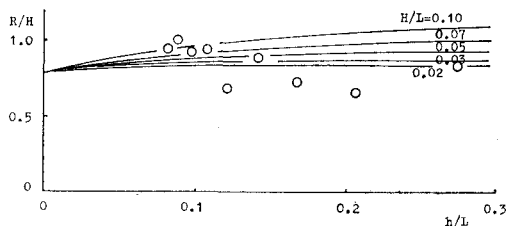
であるから、実測より R の検討がなされ、実測の P より p_0 が求められる。この式 (20) から求められる p_0 と $w_0 H$ の比を、波形勾配 (H/L) あるいは相対水深 (h/L) に対して、それぞれプロットすると、図—7 および 図—



図—7 $\frac{p_0}{w_0 H}$ と H/L の関係

表-1 全波圧の比較

実験番号	波高(cm)	波長(cm)	水深(cm)	実験値 (g/cm ²)	式(19)の法 (g/cm ²)	Sainflou 公 式 (g/cm ²)	広井公 式 (g/cm ²)	期待滑動量公 式 (g/cm ²)
1	11.4	494	40	35.3	32.5	130.9	243.6	113.7
2	11.8	453	"	45.5	44.9	134.4	261.0	121.9
3	16.5	411	"	104.6	87.5	297.5	511.5	238.2
4	19.9	369	"	154.5	130.5	510.9	743.7	347.0
5	28.0	327	"	194.7	275.0	1 035.1	1 478.7	690.2
6	14.7	283	"	65.7	72.3	240.6	406.0	189.2
7	13.5	239	"	44.9	62.5	205.2	340.8	159.4
8	9.8	194	"	25.1	33.4	101.4	180.0	84.0
9	6.5	146	"	17.4	14.9	42.6	79.6	36.9

図-8 $\frac{p_0}{w_0 H}$ と h/L の関係図-9 R/H と H/L の関係図-10 R/H と h/L の関係

8 のようになり、式 (19) の理論式よりやや小さな波圧を示しているが、これは鉛直板近辺でのエネルギー損失などの影響であると考えられよう。

また、図-9 および 図-10 は、波のうちあげ高 (R/H) と波形勾配 (H/L) あるいは相対水深 (h/L) に関する実験結果で、式 (17) の理論式とはかなり一致しているように思われる。

4. 若干の検討

ここで、全波圧 P の実験値に対して、著者らの算定法すなわち

$$P = \frac{1}{2} p_0 R \quad \dots\dots\dots (21)$$

と Sainflou 公式、広井公式、期待滑動量方式の計算値の比較をすると表-1 のとおりである。

この表-1 の結果からみると、Sainflou 公式、広井公式あるいは期待滑動量方式から算出される結果は、実験値よりもかなり大きくなっており、著者らの誘導した式 (21) によって求めた結果が最も近い値を示している。

5. 結 論

固定された鉛直板を静水面まで下ろし、静水面から波の峯までを遮蔽した場合の理論解析と実験を行った結果から、次のようなことが推察できる。

(1) 静水面における波圧は、図-7, 8 に示すように式 (19) で十分表わすことができる。

(2) 静水面以上を鉛直板で遮蔽した場合の波のうちあげ高は、波形勾配や相対水深の影響はかなり小さいが、波形勾配や相対水深が増加することにより波のうちあげ高が多少大きくなる。したがって、静水面の波圧も同じことがいえる。

(3) 波圧分布を三角形分布として全波圧を求めると、実測波圧のほうが多少大きい場合もあるが、この差は実験誤差の範囲に入る程度の大きさである。

(4) 静水面以上の波圧分布に関しては、式 (18) がなりたつものとして設計に用いて大差はないと思われる。

参 考 文 献

- 1) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第12巻第3号，1973年9月。
- 2) 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。
- 3) 小森修三・加藤正進：カーテンウォール構造物に作用する波力に関する実験的検討，第27回年次講演会講演要旨，昭和47年10月。
- 4) 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に関する研究，第19回海岸工学講演会論文集，1972年11月。
- 5) 久宝雅史・竹沢三雄・植木隆彦：波峯付近における波圧に関する実験的研究，第20回海岸工学講演会論文集，1973年11月。