

波のうちあげと波力の相関に関する実験的研究

久 宝 雅 史*・竹 沢 三 雄**・黒 沼 卓 夫***

1. ま え が き

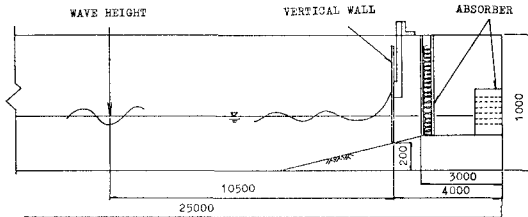
本研究は、波の構造物への作用形状と波力の相関について検討するために、波の進行方向に直角な鉛直滑面板を設け、鉛直滑面板への波のうちあげ形状およびうちあげ高と波力の強さを小形水槽で同時観測し、鉛直滑面板に作用する波のうちあげ形状を分類し、うちあげ形状の特性と波力の強さの関係を実験的に考察したものである。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は、長さ 25 m、幅 0.75 m、深さ 1.0 m の鉄筋コンクリート製一部ガラス張りの 2 次元造波水槽であり、水槽の一端にはフラップ式造波機、他端にはパイプ式消波装置を設けてある(図-1)。波力測定装置(図-2)は、幅 700 mm、高さ 700 mm、厚さ 6 mm の鋼板

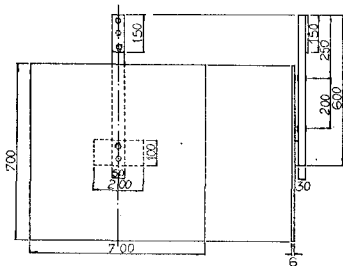
に、幅 50 mm、厚さ 30 mm、長さ 600 mm の鋼製アームをボルトにて締めつけ、この鋼製アームを上端で固定した片持梁形式の装置で、鉛直壁面に生ずる全波力は、鋼製アームの 2 点間の表裏にストレンゲージをはりつけたブリッジ回路を組みこみ、波力によって生ずる 2 点間のモーメント差をラビコードに記録させることにより求めた^{1),2)}。

実験に使用した波は、波力測定の鉛直板より 10.5 m 離れた一様な水深部での 3 波目から 6 波目までの平均波高に対する換算沖波波高 $H_0=1.7\sim23.5$ cm および 1 波目から 10 波目までの平均周期 $T=0.85\sim2.79$ sec で、一様水深部の水深は $h_0=25.5\sim49.5$ cm である。海底勾配は、モルタル塗りの固定床で、勾配 $i=1/10, 1/20, 1/30$ の 3 種について行ったが、本論では $i=1/30$ について述べるものとする。また、前脚水深 $h=5.5\sim29.5$ cm である。



(単位 mm)

図-1 実験装置概要



(単位 mm)

図-2 波力測定装置

一様水深部での波高の測定はビデオカメラで録画し、その再生画像から波高を求め、鉛直板への波のうちあげ状況には、16 mm シネカメラにて撮影し、16 mm フィルムアナライザーより波のうちあげ高およびうちあげ形状を求めた。なお、波のうちあげ高は波高に対応させ、波高と同様に 3 波目から 6 波目までの平均的な値とした。また、波力の強さは、静水時の状態を 0 として、波高および波のうちあげ高と同様に、3 波目から 6 波目の波に対応する第 1 ピーク波力を平均した値で、単位幅当りの波力に換算した。

3. 波のうちあげに関する考察

波力に関係すると思われる波のうちあげ形状を波の変形を参考にして大きく分類すると、次の 4 つの形状になる。すなわち、

- (A タイプ) 比較的砕けないでうちあがる形——非砕波のうちあげ。
- (B タイプ) 先端がとがり、頂部に飛沫を生じてうちあがる形——崩れ波のうちあげ。
- (C タイプ) 鉛直壁面上でうちあげ波形の先端が舌状に巻く形——巻き波のうちあげ。
- (D タイプ) 砕け波が空気塊を巻きこみ、しかも飛沫

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木学科
 ** 正会員 工修 日本大学助教授 理工学部土木学科
 *** 正会員 工修 日本大学助手 理工学部土木学科

を生じながらうちあがる形——砕け寄せ
波的うちあげ。

これらの形状になる波形の遷移過程について、その一
例を 16 mm フィルム解析より示すと 図-3 (a)~(d) の
ようになる。図-3 (a) は A タイプうちあげ波形の時間

的变化で、図中の番号 ①~⑩は、時間 $t=0.125$ 秒ごと
に波形変化の順番を示している。このタイプは、比較的
周期の長い波で生じ、壁面へのうちあげ形状は凸面状で
非砕波的である。図-3 (b) は B タイプの時間的変化で、
時間 $t=0.125$ 秒ごとの波形変化について ①~⑨ で示し
た。このタイプのうちあげ形状は、A タイプとは逆に、
壁面へのうちあげ形状が凹面状になり、うちあげ完了時
において、若干の飛沫を生じる。図-3 (c) は C タイプ
波形の時間的変化 ($t=0.125$ 秒間隔) で、壁面に波が達
する直前から砕波し、さらに壁面上で砕波しながら最大
うちあげ位置で舌状に巻きながら落下する。また、図-
3 (d) は、うちあげ形状 D タイプに関する時間的変化
($t=0.125$ 秒間隔) で、壁面前で空気塊を巻きこみ、し
かも飛沫状態で壁面に衝突しながらうちあがる形状であ
る。このタイプは、

比較的浅い水深で生
じる。図-4 は、海
底勾配 $i=1/30$ につ
いて、沖波波形勾配
(H'_0/L_0) と相対水深
(h/L_0) の関係を波の
うちあげ形状別の記
号で示したものであ
り、図中の曲線は砕
波指標による砕波限
界曲線である³⁾。た
だし $h=h_0$ とする。
また、波のうちあげ

図-4 波形勾配と相対水深
の関係 ($i=1/30$)

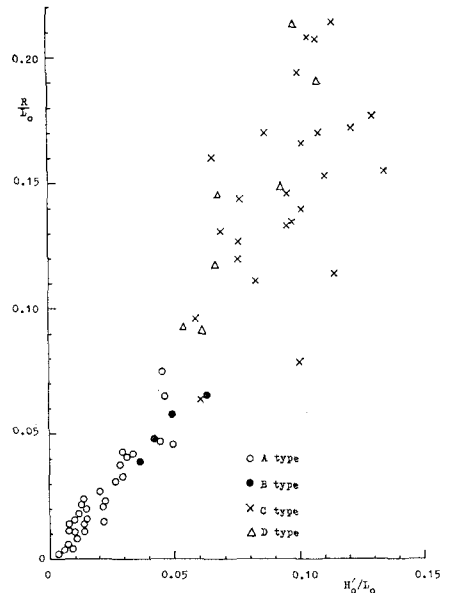
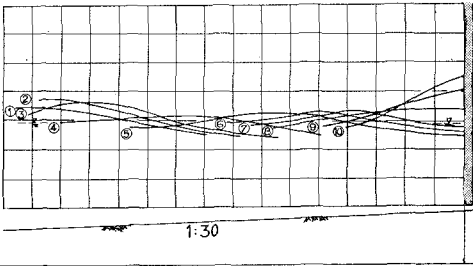
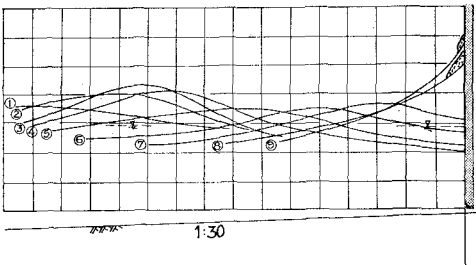


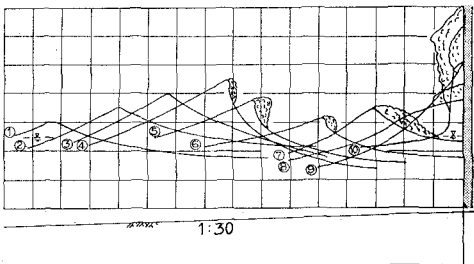
図-5 波のうちあげ高と波形勾配の関係
($i=1/30$)



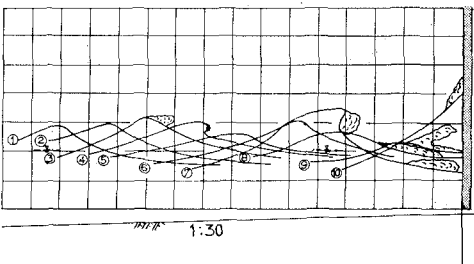
(a) 波のうちあげ形状 A タイプの時間的変化
($H'_0=8.2$ cm, $T=19.4$ sec, $i=1/30$)



(b) 波のうちあげ形状 B タイプの時間的変化
($H'_0=14.1$ cm, $T=1.52$ sec, $i=1/30$)



(c) 波のうちあげ形状 C タイプの時間的変化
($H'_0=14.2$ cm, $T=1.37$ sec, $i=1/30$)



(d) 波のうちあげ形状 D タイプの時間的変化
($H'_0=16.4$ cm, $T=1.06$ sec, $i=1/30$)

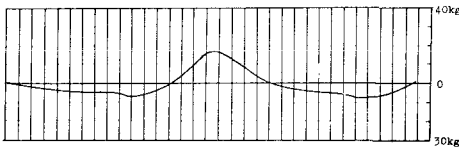
図-3

高 R におよぼす沖波波高 H'_0 の影響を求めるために、沖波波長 L_0 に対する相対うちあげ高 (R/L_0) と沖波波形勾配 (H'_0/L_0) の関係をうちあげ形状別の記号で示すと、図—5 のようになり、波のうちあげ高と沖波波高の相関はかなり高い。

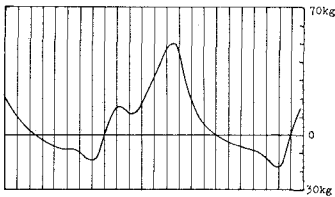
4. 波力に関する考察^{4),5)}

波のうちあげ形状別に対する波力の時間的変化を示すと、図—6 (a)~(d) であり、これは、図—3 (a)~(d) の波に対応する波力である。図—6 (a) は、非砕波的なうちあげを示す A タイプの波力に関する時間的変化で、時間 $t=0.1$ 秒間隔で示されている。この場合の波力は、1 つの平らなピークを有する単峯性の曲線であり、砕波限界に近い重複的な性質を有するものと考えられる。

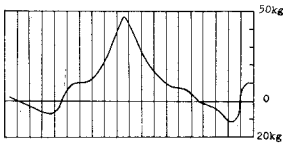
図—6 (b) は、うちあげ形状 B タイプに関する波力の時間的変化 ($t=0.1$ 秒間隔) で、第 1 ピークと第 2 ピークの間に凹部を有し、不完全砕波の状態である。図—6 (c) は、C タイプのうちあげ形状に対する波力の時間的変化で、第 1 ピークは先端が尖った形で、第 2 ピークとの間



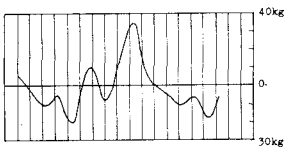
(a) うちあげ形状 A タイプによる波力の時間変化 ($H'_0=8.2$ cm, $T=1.94$ sec, $i=1/30$)



(b) うちあげ形状 B タイプによる波力の時間変化 ($H'_0=14.1$ cm, $T=1.52$ sec, $i=1/30$)



(c) うちあげ形状 C タイプによる波力の時間変化 ($H'_0=14.2$ cm, $T=1.37$ sec, $i=1/30$)

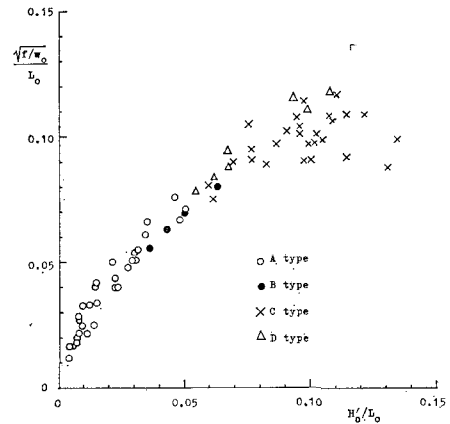


(d) うちあげ形状 D タイプによる波力の時間変化 ($H'_0=16.4$ cm, $T=1.06$ sec, $i=1/30$)

図—6

に平らな腰掛部が生じる。また、図—6 (d) は、うちあげ形状 D タイプの場合で、波の乱れが存在するため、波力の時間的変化も、他の形式に比較して非常に複雑な曲線となり、ピーク間の谷も大きい。

図—7 は、鉛直壁に作用する波力 f と沖波波高 H'_0 の関係を明らかにするため、沖波波長 L_0 に対する相対波力 ($\sqrt{f}/w_0/L_0$) と沖波波形勾配 (H'_0/L_0) について、波のうちあげ形状別の記号で示したもので、かりに沖波波長 L_0 を一定とすると、波力の平方根 $\sqrt{f}$ は、沖波波高 H'_0 に比例することになる。なお、うちあげ形状 C あるいは D タイプについてはかなりのバラツキがあるため、A あるいは B タイプの場合と多少の差違はあるものと思われる。



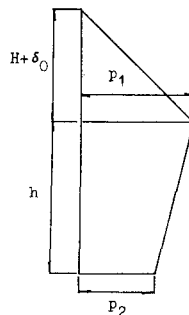
図—7 相対波力と沖波波形勾配の関係 ($i=1/30$)

以上のように、波と構造物の相互作用において、波の作用形態を (A)~(D) の 4 種のうちあげ形状で分類することができ、したがって、構造物に作用する波力もまた、4 種の分布を示すものと考えられる。

[Sainflou 的考察]

図—8 から、 $H+\delta_0=\alpha H$ とおくと、全波力 f_s は、

$$\frac{f_s}{w_0 H^2} = \frac{\alpha}{2 \cosh(2\pi h/L)} \left\{ 1 + \frac{h}{H} \left(\frac{1}{\alpha} + \cosh \frac{2\pi h}{L} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$



$$p_1 = (p_2 + w_0 h) \frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0}$$

$$p_2 = \frac{w_0 H}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$\delta_0 = (\pi H^2/L) \coth(2h/L)$$

図—8 Sainflou の波圧分布

と表わされる。ただし、 $\alpha=1+(\pi H/L)\coth(2\pi h/L)$ である。いま、かりに、この係数 $\alpha=2$ とおき、さらに、 $H=H_0$ 、 $L=L_0$ とすると、式 (1) は、

$$\frac{f_s}{w_0 H_0^2} = \frac{1}{\cosh(2\pi h/L_0)} \left\{ 1 + \left(\frac{h}{H_0} \right) \left(0.5 + \cosh \frac{2\pi h}{L_0} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)'$$

と書き改められる。ここで、Sainflou の波圧分布を簡略的に、図-9 のように示すと、波力 f は

$$\frac{f}{w_0 H_0^2} = \alpha' \left\{ \alpha' + \left(\frac{h}{H_0} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)''$$

で与えられ、 $\alpha'=1.5$ とおくと、式 (1)' とほぼ同じ値を示す。

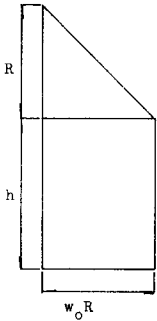


図-9 静水圧的な三角形分布

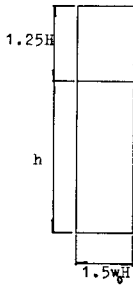


図-10 広井公式の波圧分布

[広井公式的考察]

図-10 は、広井公式による波圧分布で、この場合の全波力 f_H は、

$$\frac{f_H}{w_0 H^2} = 1.5\beta + \frac{1}{\beta} \left(\frac{h}{H} \right) \dots\dots\dots (2)$$

である。ただし、係数 β は、波力の作用する範囲で、一般には $\beta=1.25$ として採用されていることが多い。いま $H=H_0$ 、 $\beta=1.25$ とすると、式 (2) は、

$$\frac{f_H}{w_0 H_0^2} = 1.875 + 0.8 \left(\frac{h}{H} \right) \dots\dots\dots (2)'$$

となる。

[Minikin 的考察]

Minikin の波圧公式は、動圧と静圧の和で示され、全波力 f_H は、図-11 から、 $h=h_0$ 、 $H=H_0$ 、 $L=L_0$ とすると、

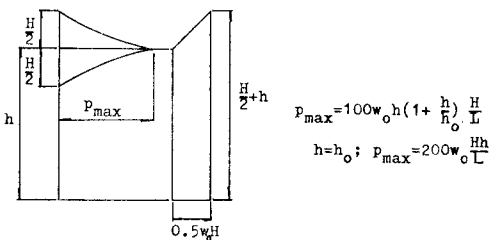


図-11 Minikin の波圧分布

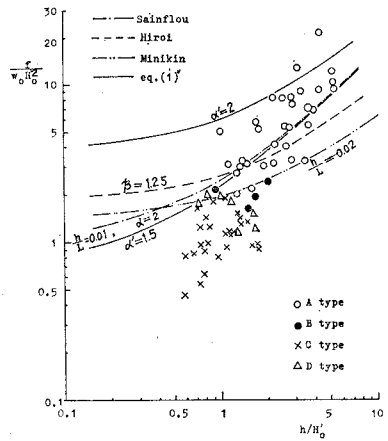


図-12 波圧分布公式による波力の比較

$$\frac{f_H}{w_0 H_0^2} = 0.125 + \frac{200}{3} \left(\frac{h}{L_0} \right) + 0.5 \left(\frac{h}{H_0} \right) \dots (3)$$

で与えられる。

これらの結果を実験結果と比較すると、図-12 のように示される。

5. 結 論

1) 鉛直壁に作用する波力と波のうちあげの相関について波のうちあげ形状を4つのタイプに分類した結果、それぞれのうちあげ形状に波力が対応し、波力の大きさは波のうちあげ形状に支配されることが明らかになった。

2) 波のうちあげ高一波長比 (R/L_0) と沖波波形勾配 (H_0/L_0) の関係で実験値をプロットすると、壁面にうちあがる形状によって、A、B、C、Dタイプがほぼ集団的になり、波形勾配の増大とともに相対うちあげ高が増大する傾向にあり、また、沖波波長 L_0 を一定とすると、波のうちあげ高 R は沖波波高 H_0 によって支配されることが明らかで、とくに、非碎波的なうちあげ形状Aタイプの場合にこの傾向が強い。

3) 波力についても、波のうちあげ高 R とほぼ同じ傾向を示し、波力一波長比 ($\sqrt{f}/w_0/L_0$) と沖波波形勾配 (H_0/L_0) の関係で実験値をプロットすると、うちあげ形状A、B、C、Dタイプに対してほぼ集団的になり、沖波波高 H_0 が増大するにつれて波力の強さが大きくなる傾向にある。

4) 以上の結果より、波力の強さは、波のうちあげ高に関連させて考えることができ、現在の設計波圧公式に、波のうちあげ形状と波のうちあげ高の要素を加味して考えると、合理的な波圧公式が求められよう。

5) 本論における実験範囲では、波力 f の強さは、波のうちあげ高 R に関連する三角形状の静水圧の分布としてとりあつかうことができ、非碎波的なうちあげ形

状 A タイプの場合には、波のうちあげ高 R を沖波波高 H_0' の 2 倍に、砕波的なうちあげ形状 B, C, D タイプの場合には沖波波高 H_0' の 1.5 倍にとった静水圧的な三角形分布で与えると合理的であると考えられる。

6) 波のうちあげ形状は、入射波の砕波形式に準ずるものと予想され、したがって波力の強さも砕波形式にかなり密接な関係があるものと考えられる。砕波形式と波のうちあげ形状の関係については、目下検討中である。

なお、この研究を進めるにあたり、実験と資料の整理に御助力いただいた和歌山高専小池一臣氏ならびに実験水槽の使用にあたり御協力いただいた東光コンサルタント(株)の各位に対し、深甚なる感謝の意を表する次第である。

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，港研報告，Vol. 3, No. 1, 1964.
- 2) 久宝雅史・竹沢三雄・樋口豊久：鉛直壁に作用する波力について，第 31 回年講概要集，土木学会，pp. 45-46, 1976.
- 3) 合田良実：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，No. 180, pp. 39-49, 1970.
- 4) 光易 恒：波圧論，1965 年度水工学に関する夏期研修会講義集，B. 海岸港湾コース，1965.
- 5) 堀川清司・野口雄二：直立壁に作用する砕波の波力と波面との関係，第 17 回海岸工学講演会論文集，pp. 177-184, 1970.