

岩礁上の円柱に働く波力について

合 田 良 実*

1. ま え が き

海中に建設される各種の構造物の中で、古くからのものに灯標がある。灯標は、多くの場合、孤立した岩礁の上に建設され、強大な波力にさらされる。こうした岩礁上の構造物に働く波力は、一樣水深あるいは一樣傾斜の箇所における波力とは異なるにもかかわらず、その詳細が不明なために、一樣水深における波力公式が準用されてきた。このたび、海上保安庁燈台部より要請のあったのを機会に、岩礁上の円柱に働く波力に関する実験を行ったので、その概要を報告する。

2. 現行の波力計算式について

現在、灯標などの円柱体に働く波力の計算式としては、広井式と藤野式が使われている¹⁾。広井式は、防波堤に対する波圧公式を、円柱に対する補正係数0.7を乗ずるもので、円柱体の投影面積に次の波圧を一樣に作用させる。

$$p = 0.7 \times 1.5 w_0 H = 1.05 w_0 H \quad \dots\dots\dots (1)$$

藤野式²⁾は、柱状部材に働く波力の計算式である Morison の式のうち抗力のみをとり、水平粒子速度として McCowan の孤立波理論における碎波限界 ($H=0.78h$) の波のものを扱うもので、直径 D 、高さ dz の円柱部分に働く波力が次のように表わされる。

$$dF = \frac{w_0}{2g} C_D Du^2 dz \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 w_0 : 水の単位体積重量、 C_D : 抗力係数

一方、著者は、同じく Morison の式を使い、水平粒子速度として、実験式による係数を微小振幅波理論による値を乗じたものをを用いる方法を提案した³⁾。

以上のうち、藤野式および著者の方法によるものは、若干の変形を行なうと平均波圧強度の形に表わすことができる⁴⁾。すなわち、

$$\beta(z) = \frac{p(z)}{w_0 H} = \frac{dF}{w_0 D H dz} \quad \dots\dots\dots (3)$$

これによって、上記3種の波力計算式を比較したのが、図-1である。広井式では H/h の値が任意であるが、ここではわかりやすく $H/h=0.8$ とした。藤野式では $H/h=0.78$ であり、著者の方法では $h/L=0.05$ の条件において $(H/h)_{\max}=0.795$ である。

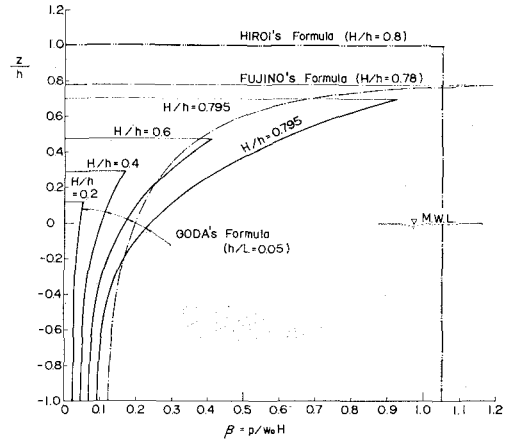


図-1 現行の計算式における平均波力係数

この図から明らかなように、波頂付近では三者とも差が少ないけれども、波頂から下につれて藤野式および著者の方法による値が著しく減少する。波頂から静水面 $z=0$ までの平均では、広井式が $\bar{\beta}=1.05$ 、藤野式が $\bar{\beta}=0.40$ 、著者の方法が $\bar{\beta}=0.51$ となる。また、 H/h の小さいときはこの差がさらに開く。

このような差異を示す各計算法の妥当性を実験的に検討するため、以下の実験を行なった。

3. モデル岩礁による実験

(1) 模型および実験水路

実際の岩礁は、その大きさおよび形状がさまざまであり、これを模式化するに無理がある。しかし、岩礁上の円柱の波力を一般的に検討するには何らかの岩礁モデルを使わなければならないので、灯標の建設地点の例を参考にして図-2のような円形礁および岩棚モデルを採用

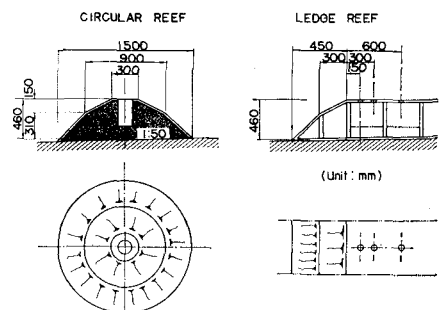


図-2 模型円形礁および岩棚の形状

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋水利部

した。円形礁は山土で形を作り、表面をモルタル塗りした。頂部には、模型円柱を設置するため、内径 16 cm、深さ 30 cm の円形の孔を設けた。岩棚は耐水合板で製作した。

円形礁は、図-3 に示す仮設水路の中に固定し、岩棚は手前側の仕切壁で区切られた幅 60 cm の小水路内に、造波板からの距離が円形礁と同一である位置に設置した。

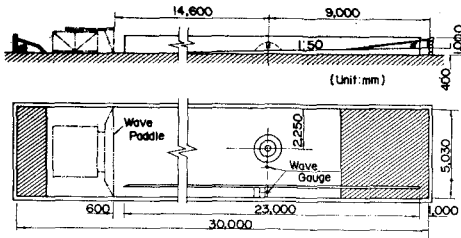


図-3 実験水路

実験にあたっては、岩棚の設置前に、その位置における通過波高をすべての実験条件について3回繰り返して測定し、その平均値をもって円形礁および岩棚に対する入射波高とした。なお、岩棚上の波頂高および波力の測定は、反射波が戻ってくる前の波のみを対象とした。

実験条件および実験の範囲を表-1に示す。参考のため、模型縮尺を 1/40 と考えたときの現地換算値も示してある。

表-1 実験条件

諸 元	模 型	現 地 (換算縮尺 1/40)
前面水深 h (m)	0.36~0.56	14.4~22.4
海底からの岩礁の高さ h_c (m)	0.46	16.4
海底面の岩礁の直径 D_r (m)	1.50	60.0
岩礁上の水位 $d=h-h_c$ (m)	-0.1~+0.1	-4.0~+4.0
円柱の直径 D (m)	0.02, 0.03	0.8, 1.2
波の周期 T (sec)	1.3, 1.7, 2.3	8.2, 10.7, 14.5
波 高 H (m)	0.1~0.3	4.0~12.0

(2) 岩礁上の波頂高

円形礁上の波頂高は自動検定式波高計で測定し、岩棚上の波頂高は容量式波高計で求めた。いずれも、のり肩から 15 cm の位置における値である。各実験条件におい

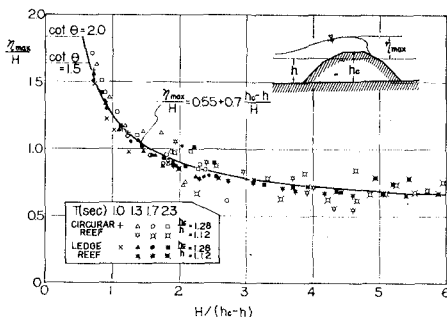


図-4 岩礁上の波頂高 (干出時)

て3回繰返し測定を行ない、測定対象の 15~21 波について平均した結果を入射波高と比較したのが 図-4, 5 である。

図-4 は、岩礁の頂部が静水面より上にある場合で、このときは、岩礁の種類および周期にかかわらず、波高 H と静水面上の岩礁の高さ (h_c-h) との比をパラメーターとして、 $\eta_{\max}/H$ が一義的に表示される。これは、岩礁の前面が 1~2 割で急なため、円形礁の場合でも波の集中効果が現われなかったためと考えられる。なお、 $H/h \rightarrow 0$ の場合には Miche あるいは Lewy による次の極限值⁵⁾をとるものと推定される。

$$\frac{\eta_{\max}}{H} = \sqrt{\frac{\pi}{\theta}} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 θ : 前面の傾斜角 (ラジアン)

一方、岩礁の頂部が静水面以下の場合には、図-5 のように円形礁の方が大きな相対波頂高を示す。岩棚の場合には、周期の短い波の方が $\eta_{\max}/H$ が低い傾向にあり、これは後述のようにのり肩からの距離が、波の減衰距離に対して相対的に長くなるためと考えら

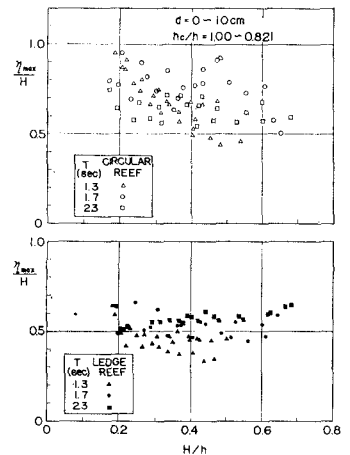


図-5 岩礁上の波頂高 (水没時)

る。このような岩礁上の波頂高に対し、一様水深における進行波では $\eta_{\max}/H$ が 0.5~0.8 であり、 H/h の増加につれて次第に増大する。したがって、岩礁上の波は進行波とはかなり異なる波頂高を示すといえる。

(3) 岩礁上の水粒子速度

実験波のうち、円形礁上の水深が $d=10$ cm のときの $T=1.7$ sec の波については、電磁誘導式の小型プロペラ流速計を用いて、水粒子速度の測定を行なった。図-6 はその結果の一例で、第4波の山が続いている間の最大流速の鉛直分布を示す。 $H=34.1$ cm の波では流速の最大値が 2.1 m/sec にも達しており、微小振幅波としての波速を上ま

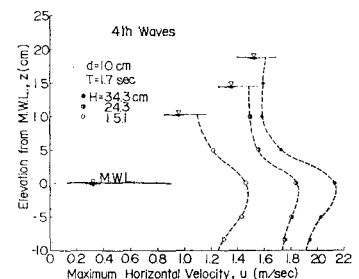


図-6 岩礁上の最大粒子速度の鉛直分布

わっている。また、流速分布は静水面からやや下で最大値を示すものの、かなり一様分布に近い。さらに、波高が減少しても流速はあまり低下しない。

そこで、流速計を岩礁の頂面から 1.6 cm の高さに固定して、波高の小さい領域における流速の変化を調べた結果が 図-7 である。この図には、波の谷が続いている間の冲向きの最大流速も示してある。

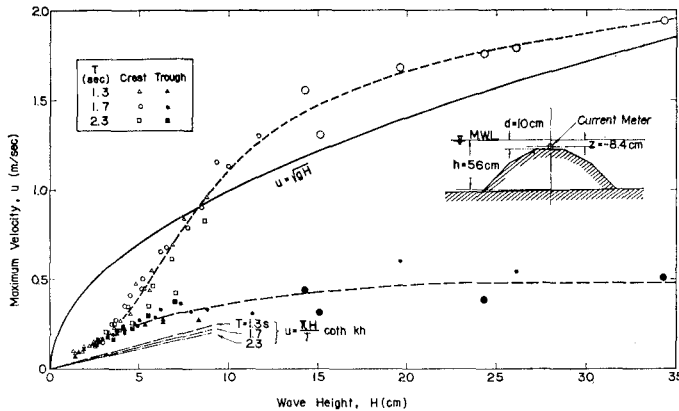


図-7 岩礁上の流速と波高との関係

実験結果では $H=4$ cm 付近までは波の山と谷の値が等しく、波高とともに直線的に増加しており、微小振幅の振動波としての性質を保持している。しかし、 $H \geq 4$ cm では波の山の粒子速度が急増し、波の谷の値は増加がぶって、両者の値がかけ離れる。実験中の観察では、 $H \approx 6$ cm で波頭が白く崩れ、波高がさらに増すと、砕け寄せ波のように波の足元の方から崩れて岩礁上を走り抜けるようになる。 $H \geq 10$ cm では、最大粒子速度が $\sqrt{gH}$ にほぼ比例する。

このような岩礁上の波の特性は、高さ H のダムが突然に決潰したときの流れ⁶⁾に類似していると考えられる。

(4) 円柱に働く波力

模型円柱としては、直径 20 および 30 mm の透明アクリル管を用い、これを直径 15 cm、高さ 22.5 cm のコンクリート円柱に埋め込んで自立させた。円柱には波力の測定のため、図-8 に示すように岩礁頂面に相当する高さで、これから $dl=5$ cm 下った位置にストレインゲージを接着した。上・下ゲージの位置における曲げモーメントをそれぞれ M_u 、 M_l とすると、全波力およびその作用点の高さは、次式で与えられる。

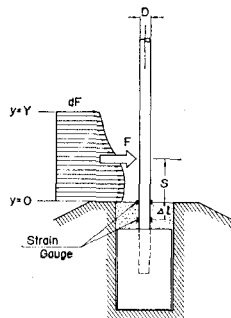


図-8 波力測定方法

$$\left. \begin{aligned} F &= \int_0^x dF = \frac{1}{dl} (M_l - M_u) \\ S &= \frac{1}{F} \int_0^x y dF = \frac{M_u}{F} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

この方法で求めた全波力の作用点の高さを、前項の粒子速度の測定値を式 (2) に代入して計算し、抗力の作用点を求めた結果 10 例と比較したところ、差は 1~2 cm

であり、この方法が信頼できるものと判断された。また、全波力の測定値と抗力としての計算値との比較から、 $C_D=0.63 \sim 0.73$ の推定値が得られた。この値は、 $R_e=(4 \sim 6) \times 10^4$ の定常流中における $C_D=1.2$ よりもかなり小さい。しかしこれは、計算において流速のピークと水位のピークが同時に起こるものと仮定(実際には前者が早い)したこと、流れの非定常性が強いこと境界層の剝離状態が定常流中とは異なることと考えられること、などの理由によるものであろう。

波力の測定記録は、1 波ごとに解析して全波力とその作用点の高さを算出した。この全波力から、あらかじめ測定しておいた

波頂高を用いて、波力の分布を一樣と見なした場合の平均波圧強度 p を求め、さらにこれを $w_0 H$ で割って平均波力係数 β_F を算出した。すなわち、

$$p = \frac{F}{D(d + \eta_{\max})}, \quad \beta_F = \frac{p}{w_0 H} \dots \dots \dots (6)$$

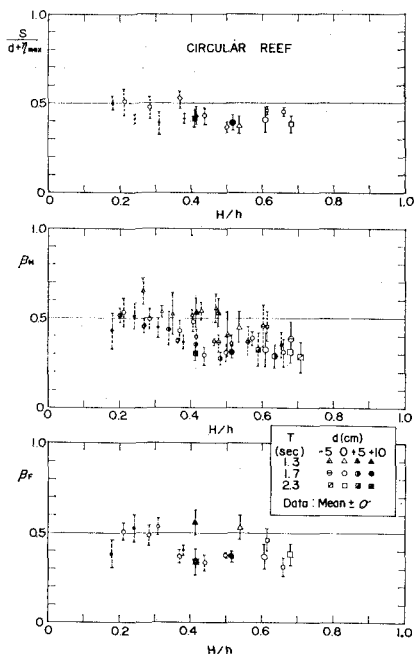
さらに、上ゲージによる曲げモーメント M_u を用いて、波力の分布を一樣と見なしたときの、モーメント換算の平均波力係数 β_M を次式で求めた。

$$\beta_M = \frac{2M_u}{w_0 H D (d + \eta_{\max})^2} \dots \dots \dots (7)$$

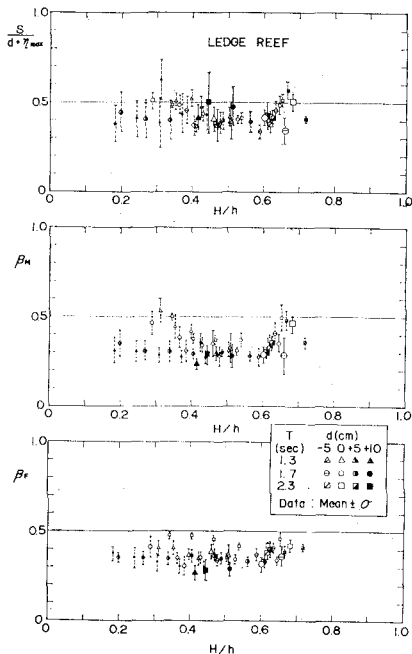
以上の解析結果は、円形礁が 図-9、岩棚が 図-10 に示されている。データは、いずれも〔平均値±標準偏差値〕である。

円形礁は直径 30 mm の円柱の場合である。記録のうち約半数は上ゲージのデータしか使えなかったため、 S および β_F のデータが少なくなっている。図-9 の結果では、作用点の高さ S が波の作用範囲 $(d + \eta_{\max})$ の 1/2 よりもやや低く、203 波の総平均では両者の比が 0.419 ± 0.066 である。これは、図-6 の流速分布の形に対応するものである。また、平均波力係数 β_M 、 β_F は、図-7 の流速と波高との関係に対応して、 $H/h \approx 0.25$ でなだらかなピークを示す。全体としては、 β_M が 563 波の総平均で 0.401 ± 0.120 、 β_F が 203 波の総平均で 0.424 ± 0.101 である。

一方、岩棚の場合は直径 20 mm と 30 mm の両方のデータを加え合せた 712 波の結果である。波力の作用点は、円形礁と同様、波の作用範囲の 1/2 よりも低く、



図—9 円形礁上の円柱の波力係数



図—10 岩棚上の円柱の波力係数

$S/(d+\eta_{\max})$ の比は 0.421 ± 0.094 である。また、平均波力係数は円形礁の場合よりも 20% ほど小さく、総平均では β_M が 0.324 ± 0.080 , β_F が 0.354 ± 0.061 である。

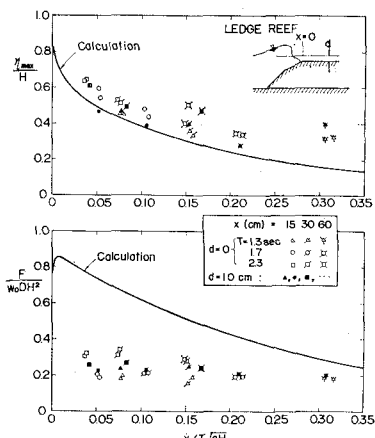
以上の波力の測定結果を現行の波力計算式による値と比べてみると、波力の分布としてはほぼ一様で広井式の形に近いけれども、その絶対値は広井式の $1/3 \sim 1/2$ で

あり、藤野式あるいは著者の方法による波力を静水面上について平均した値にほぼ近い。すなわち、現行の計算式はいずれも岩礁上の波力の実態を表わしていない。

なお、図—9, 10 の結果は衝撃性あるいは自励的振動を無視し、振動の中心を通る曲線について解析したものである。測定記録の約 10% には、衝撃性波力によると見られる固有減衰振動が認められた。これらについて模型円柱の衝撃応答係数を考慮して解析した結果、最大波力に対する衝撃波力振幅の比率が、出現率 1% で 0.7, 出現率 0.1% で 1.2 と推定された。

(5) 岩棚上の位置による波力の変化

岩棚の実験では、のり肩から 30 および 60 cm の位置における波頂高および波力 ($D=20$ mm) を、一部の波について測定した。図—11 はこの結果である。図の横軸は、波の周期である T 秒間に流速 $\sqrt{gH}$ で進む距離 $T\sqrt{gH}$ を基準長にとって距離 x を



図—11 岩棚上の位置による波頂高と波力の変化

無次元化したものである。波頂高の場合には、 $\eta_{\max}/H$ が $x/T\sqrt{gH}$ の増加とともにほぼ一義的に減少する。図中の曲線は、高さ H , 高さ $l=0.5T\sqrt{gH}$ の直角三角形形状の水塊が速度 $u_0=0.75\sqrt{gH}$ で前進しながら、決潰ダムからの流出のように崩れるものとして計算したものである。波頂高についてはほぼ実験値の下限を与える。

一方、全波力については $x/T\sqrt{gH}$ に伴う波力の減少が少なく、また計算値は過大な値を与える。これは、流出部先端の流速が計算の上では $2\sqrt{gH}$ 以上になるのに対し、実際には残留水位や摩擦抵抗の影響で $u \approx \sqrt{gH}$ に押えられることに起因するものである。

今回実験した $x/T\sqrt{gH} \leq 0.3$ の範囲では、全波力の絶対値はほとんど変化しないと見るべきであろう。ただし、モーメントとしては波頂高が低下するためある程度減少する。しかし、実用的な観点からは、構造物の位置をこの程度後退させることは、安全率の余裕が高められたと考えるべきであり、波力の減少を設計上で考慮できるのは、 $x/T\sqrt{gH}$ の値がさらに大きな場合であろう。

4. むすび

以上述べたように、岩礁上の波の性質は一様水深にお

ける進行波と異なるところが多く、構造物に働く波力の計算式もこの特性を考慮に入れたものに改良すべきである。具体的には、次のようにするのが適当と思われる⁴⁾。

i) 設計波高 $H_{\max}$

$$H_{\max} = \min \{2H_{1/3}, H_b\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに, $\min \{a, b\}$: a, b のいずれか小の値

H_b : 前方 $10 H_{1/3}$ の地点における限界波高

ii) 波頂高 $\eta_{\max}$

$$h_e > h: \eta_{\max} = \max \{0.75 H_{\max}, [0.55 H_{\max} + 0.7(h_e - h)]\}$$

$$h_e \leq h: \eta_{\max} = 0.75 H_{\max} \dots\dots\dots (9)$$

ここに, $\max \{a, b\}$: a, b のいずれか大の値

iii) 波圧強度 p

$$p = 0.5 w_0 H \dots\dots\dots (10)$$

ただし、岩礁頂面から上記の波頂高まで一様に作用すると見なす。

この計算法の適用範囲、これを灯標の建設例について検討した結果、および実験の詳細については文献 4) を参照されたい。

なお、本研究の実施にあたっては、海上保安庁燈台部

工務課の筆脇秀夫前建設係長を初め燈台部の各位より種種御教示ならびに御助力頂いた。中でも、池田龍彦技官には波力計算式の検討ならびに実験の実施にあたり長期間熱心に御協力頂いた。また実験は、港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室の笹田 正技官および岸良安治技官の全面的協力の下に実施されたものである。ここに記して、上記の各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) たとえば、長崎作治：海洋構造物の設計と施工，森北出版，1970 年，pp. 23~32,
- 2) 藤野義男：灯標の建設に関する研究，1957 年，282 p.
- 3) Goda, Y.: Wave forces on a vertical circular cylinder: experiments and a proposed method of wave force computation, Rept. Port and Harbour Res. Inst., No. 8, 1964, 74 p.
- 4) 合田良実・池田龍彦・笹田 正・岸良安治：岩礁上の円柱の設計波力に関する研究，港湾技術研究所報告，第 11 巻第 4 号（予定），1972.
- 5) Stoker, J. J.: Water Waves, Interscience Pub., 1957, p. 73.
- 6) 同上 pp. 333~341. または、本間 仁・安芸皎一編：物部水理学，岩波書店，1962, pp. 310~315.