

不規則波に対する波力発電ケーソンの空気出力に 関する理論と実験

高橋 重雄*・小島 朗史**・鈴村 諭司***

1. ま え が き

港湾技術研究所では、波エネルギーを電気のエネルギーに変換する機能を合せ持つ防波堤、波力発電ケーソン防波堤の開発を行っている。波力発電ケーソンは空気室と呼ばれる部分で波のエネルギーを空気のエネルギーに変換し、それによってタービン・発電機を回転させ、電気を発生させるものである。このケーソンの規則波に対する空気出力特性および水理特性についてはすでに検討されており、小島・鈴村・合田によって昭和 58 年度の実験に発表されている¹⁾。

海の波は実際には大きく変動する不規則波である。したがって、波力発電ケーソンの諸元を決定したり、これに設置するタービン・発電機を検討する場合には、規則波でなく不規則波に対する空気出力特性、および水理特性を明らかにする必要がある。本報告では、これまでの規則波に対する理論を拡張して不規則波にも適用できるようにし、これを実験的に検証した。また、不規則波に対する空気出力特性ならびに水理特性について、特に規則波に対する特性と対比しながら、計算結果と実験結果に基づいて検討を加えた。

2. 不規則波に対する空気出力理論

(1) 波のパワー

波のパワーは規則波では、 ρ_w を水の密度、 g を重力加速度、 H を波高、 C_g を波の群速度として、 $0.125\rho_w g \cdot H^2 C_g$ で表わされる。一方、不規則波では、 $S(f)$ を波のスペクトル密度とし、 $C_g(f)$ を各周波数に対する群速度として

$$W_I = \rho_w g \int_0^\infty S(f) C_g(f) df \quad \dots\dots\dots (1)$$

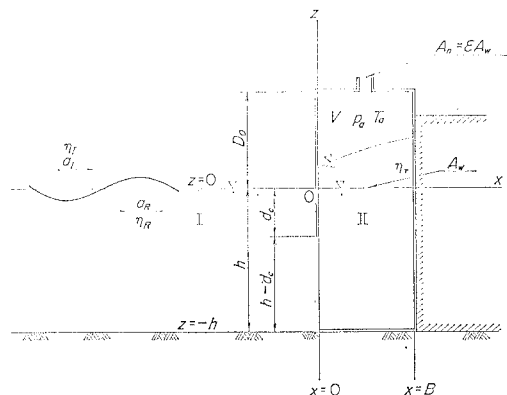
と表される。ただし、近似的には規則波では $0.955 H^2 T$ であり、不規則波では有義波周期 $T_{1/3}$ と有義波高 $H_{1/3}$

により $0.44 H_{1/3}^2 T_{1/3}$ となる²⁾。

(2) 空気室の定義と波パワーから空気パワーへの変換

図一は、波力発電ケーソンの構造諸元と座標系を示したものである。静水面上に x 軸があり、ケーソン前面に z 軸がある。 $x=0$ から $x=B$ までが空気室である。海側から入射した波 η_I は、 $x=0$ の前壁の下端 ($z=-d_0$) から底面 ($z=-h$) までの開口部から空気室内に入り、空気室内に部分重複波 η_r をつくる。部分重複波はその波面の上下動によって空気室内の空気を圧縮・膨張させ、ノズルに空気流をつくる。すなわち、空気室内の体積 V が変化し、同時に圧力 p_a 、温度 T_a が変化する。空気室内の温度と大気温 T_0 との差により空気流 w_p がノズルに発生し、それとともにエネルギーが消費される。一方、入射波のエネルギーの一部は反射波 η_R として海側に反射される。なお、空気出力の理論では、ノズルによる負荷でタービンの負荷を表わすことにしている。ノズルの負荷は、その空気室の面積 A_w に対するノズル開口部の面積 A_n の比 ϵ によって変化する。

空気パワー W_a はノズルを流れる流量 $w_p A_n$ とその圧力 p_a の積によって定義される。ただし、通常のノズル開口率であれば、 $(p_a - p_0) dV$ でも表わせる。これらはいずれも瞬時瞬時の出力であり、平均空気パワー W_a はこれらの時間的平均値である。空気室の設計において



図一 空気室諸元と座標系

* 正会員 M.S. 運輸省港湾技術研究所水工部波エネルギー研究室長

** 正会員 前運輸省港湾技術研究所水工部波エネルギー研究室長

(現運輸省第三港湾建設局和歌山港工事事務所長)

*** 前運輸省港湾技術研究所水工部波エネルギー研究室 (現横須賀市役所土木部)

は、波のパワーから空気のパワーへの変換効率（空気出力効率 EFF ）が最も重要であり、 EFF は、 $\bar{W}_a$ と W_I の比で求められる。

(3) 基礎式

規則波に対する空気出力理論では、上述した変換過程が以下に示す式で表される。

$$\frac{d(\rho_a V)}{dt} + \dot{m} = 0 \quad (2)$$

$$p_a \frac{dV}{dt} + c_v \frac{d}{dt} \left(\frac{p_a V}{R} \right) + \dot{m} c_p T_e = 0 \quad (3)$$

$$a_I \sin(\sigma t - \phi_I) - a_R \sin(\sigma t - \phi_R) \\ = a_T \sin k B \cos \sigma t \quad (4)$$

$$a_I \sin(\sigma t - \phi_I) + a_R \sin(\sigma t - \phi_R) \\ = \frac{1}{\rho_w g} f(kh, kd_c) p^* + a_T \cos k B \sin \sigma t \quad (5)$$

ここに、

$$\dot{m} = \rho_e c_d \varepsilon A_w w_p \quad (6)$$

$$w_p = \beta \varphi \sqrt{2c_p |T_a - T_0|} \quad (7)$$

$$f(kh, kd_c) \\ = \frac{2 \cosh kh \sinh k(h-d_c)}{\cosh k(h-d_c) \sinh k(h-d_c) + k(h-d_c)} \quad (8)$$

である。 c_d は縮流係数、 φ は速度係数、 c_v は定容比熱、 c_p は定圧比熱、 R はガス定数である。 T_e は絶対温度で流入時には $T_e = T_a$ 、流出時には $T_e = T_0$ である。 ρ_e は空気の密度で、流入時には $\rho_e = \rho_a$ 、流出時には $\rho_e = \rho_0$ である。 ρ_a は空気室内の空気の密度、 ρ_0 は大気のものである。 β は流出時に 1.0、流入時には -1.0 をとる。 k と σ はそれぞれ規則波の波数・周波数であり、 a_I 、 a_R 、そして a_T は、それぞれ入射波、反射波そして部分重複波の振幅である。なお、式 (2) と (3) はそれぞれ空気室内の質量とエネルギーの保存式であり、式 (4) と (5) は $x=0$ の開口部における波の圧力と流量の連続式である。式 (4) と (5) より a_R に関する項を消去すると、

$$2a_I \sin(\sigma t - \phi_I) \\ = \frac{1}{\rho_w g} f(kh, kd_c) p^* \\ + a_T (\sin k B \cos \sigma t + \cos k B \sin \sigma t) \quad (9)$$

となる。

式 (2), (3), (9) は、波が規則波であれば近似的に、

$$V^* = V - V_0 = -A_w a_0 \sin \sigma t \quad (10)$$

$$T^* = T_a - T_0 = \alpha T_0 \sin \sigma(t + r) \quad (11)$$

$$p^* = p_a - p_0 = \lambda p_0 \sin \sigma(t + r) \quad (12)$$

と置き、空気室内の x 軸方向に平均した水位 η の振幅 a_0 と部分重複波 η_T の振幅 a_T の関係を

$$a_0 = \frac{\sin k B}{k B} a_T \quad (13)$$

と置くことによって解くことができる。その解について

はすでに詳しく述べているので、ここでは省略する。

(4) 線形重ね合法による不規則波への適用

波が不規則であっても、規則波に対する解を用いて空気出力を求めることができる。これは、波の各周波数成分波に対する規則波の解を重ね合わせるものであり、線形重ね合法 (LSM) と呼ぶことにする。

波が不規則なときの圧力 p^* と空気室内の平均水位 η は不規則であり、多くの周波数成分の重ね合わせとして表すことができる。すなわち、

$$p^* = \sum_{i=1}^n p_i^* = \sum_{i=1}^n p_{iM}^* \sin(\sigma_i t + \sigma_i \tau_i + \delta_i) \quad (14)$$

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i = \sum_{i=1}^n \eta_{iM} \sin(\sigma_i t + \delta_i) \quad (15)$$

である。ここに、 p_{iM}^* と η_{iM} はそれぞれ、圧力と水位の成分波 p_i^* と η_i の振幅である。 $\sigma_i \tau_i$ は p_i^* と η_i との位相差であり、また、 δ_i は各周波数成分波間の位相差である。一方、入射波 η_I も各成分波 η_{Ii} に分けられ、

$$\eta_I = \sum_{i=1}^n \eta_{Ii} = \sum_{i=1}^n a_{Ii} \sin(\sigma_i t + \phi_{Ii} + \delta_i) \quad (16)$$

となる。ここに a_{Ii} は入射波の成分波 η_{Ii} の振幅で、 ϕ_{Ii} は η_i に対する位相差である。それぞれの成分波の p_i^* と η_i が対応する周期の入射波の成分 η_{Ii} によって生じていると考え、各周波数成分をそれぞれ規則波として取扱って解を求め、それを線形的に重ね合わせることによって不規則波に対する p^* と η を求めるのが線形重ね合法である。すなわち、入射波を式 (16) のように分解し、それぞれの入射波成分に対して、 p_{iM}^* 、 η_{iM} 、 $\sigma_i \tau_i$ 、 ϕ_{Ii} を求め、式 (14)、(15) によってそれぞれ p^* や η を求める。また、空気パワーは各周波数成分の空気パワーの和であり、

$$\bar{W}_a = \sum_{i=1}^n \bar{W}_{ai}, \quad \bar{W}_{ai} = 0.5 A_w \sigma_i p_{iM}^* \eta_{iM} \sin \sigma_i \tau_i \quad (17)$$

で求められる。

ただし、実際には基礎式は線形ではなく、たとえば、規則波において同一周期でも波高によって空気出力効率が変化してしまう。これは、式 (11) および (12) において、波高の変化に対して $\sigma \tau$ が変化してしまうことに対応する。したがって、各周波数成分に対する $\sigma \tau$ を求める際には、 a_I として入射波の各周波数成分の振幅 a_{Ii} ではなく、 $a_I = 0.5 H_{1/3}$ として計算した。

(5) 逐次計算法による不規則波への適用

式 (8) に $\eta_I = a_I \sin(\sigma t - \phi_I)$ 、 $\eta = a_0 \sin \sigma t$ 、 $d\eta/dt = \sigma a_0 \cos \sigma t$ を代入すると、

$$2\eta_I = \frac{1}{\rho_w g} f(kh, kd_c) p^* + \frac{k B}{\tan k B} \eta + \frac{k B}{\sigma} \frac{d\eta}{dt} \quad (18)$$

となる。一方、式 (2) と (3) に $p_a = p^* + p_0$ 、 $T_a = T^* + T_0$ 、 $V = (D_0 - \eta) A_w$ の式を代入し、近似を行くと、

$$\frac{dp^*}{dt} = \gamma \frac{p^* + p_0}{D_0 - \eta} \left\{ \frac{d\eta}{dt} - \beta \varepsilon \sqrt{2c_p |T^*|} \right\} \dots (19)$$

$$\frac{dT^*}{dt} = \frac{T^* + T_0}{D_0 - \eta} \left\{ -\frac{d\eta}{dt} + \frac{D_0 - \eta}{p^* + p_0} \frac{dp^*}{dt} + \beta \varepsilon \sqrt{2c_p |T^*|} \right\} \dots (20)$$

の式が得られる。

式(18)は波が規則波のときに成立し、不規則波では成立しない。しかしながら、式中の σ と k を有義波の $k_{1/3}$ と $\sigma_{1/3}$ で代表させ、不規則な波にも近似的に適用できると考え、式(18)、(19)および(20)により、不規則な入射波の刻々変化する水位 η_T に対し、 p^* 、 η および T^* の変化を計算する。これが逐次計算法(TSM)であり、数値計算はRunge-Kutta-Gill法による。なお、空気パワーは各時間ステップの p^* と η よりえられる。

3. 実験方法

実験は長さ105m、深さ2.5m、幅3mの大型造波水路を用いて行った。ただし、この水路は隔壁によって幅80cmと205cmに分けられており、幅80cmの水路を用いた。空気室での水深は1mであり、空気室の高さ D_0 は静水面上80cm、水路長方向の幅 B が80cm、前壁の没水深 d_e が20cmである。空気室の天井部に設けられたノズルの開口率 ε は、1/75、1/100そして1/150の3種類である。

実験波は規則波と不規則波である。規則波の周期 T は1.0~4.5s、波高は5~60cmである、不規則波の有義波周期 $T_{1/3}$ は1.0~4.5s、有義波高は4~40cmである。不規則波のスペクトルは、ブレットシュナイダー・光易型を目標としたが、実現されたスペクトルは、有義波周期が短い場合には高周波側で目標よりやや低い傾向となった。実現した不規則波の波高分布はレーリー分布によく一致している。規則波実験では波高の比較的一定な連続した8波を測定対象波としており、不規則波実験では100波を1つの波群と考え、同一の有義波周期と波高に対し3つの波群を用いた。

実験では、空気室の天井部に圧力計を2個設けて空気圧を測定し、水位計2台により空気室内の水位変化を測定した。ノズル内には熱線風速計を置き、風速を測定している。また、空気室の前面に1台、および沖側1波長の位置に2台の波高計を設置し、そこでの水位変化を測った。沖側の波高計のデータは入射波と反射波の分離計算に用いている。測定されたデータはAD変換器を通して計算機内に収録し、解析を行った。解析では、2台の圧力計の値の平均値を圧力 p^* とし、2台の水位計の単純平均を平均水位 η とみなした。これらのデータから時々刻々の空気出力 W_a を計算し、その時間的な平均値(平均空気パワー)を求め、空気出力効率を求めている。

また、解析では入射波の一波一波に対応する p^* 、 η 、 W_a 、 w_p のピーク値も求めている。不規則波の場合には、それぞれのピーク値から最大値、1/10最大値、1/3最大値、平均値等を求めており、これらは、たとえば p^* の場合 $p_{\max}$ 、 $p_{1/10}$ 、 $p_{1/3}$ 、 p_{mean} と表示される。不規則波の場合ピーク値の1/3最大値が代表値として重要であるが、最大値や1/10最大値も不規則波特有の変動幅を知るうえで重要である。規則波の場合には、ピーク値の平均値が重要であり、これを不規則波の場合と区別するために、たとえば p^* の場合には p_m と表示した。

4. 実験結果と考察

(1) 測定例と計算例

図-2は $T_{1/3}=2.53$ s、 $H_{1/3}=27.2$ cmの波が作用したときの測定波形の例を示すものであり、同図にはその入射波に対して計算して得た波形も示している。添字(EXP)は測定波形、(LSM)は線形重ね合せ法による計算波形、(TSM)は逐次計算法による波形であることを示す。入射波 η_I の変動に対応して圧力 p^* や水位 η が変動し、空気パワー W_a が得られる様子がよくわかる。ただし、圧力と水位はほぼ90°位相がずれており、空気パワーは一波で2つの正のピーク値が表われている。また風速 w_p の実験値は、測定器が風速の方向を識別でき

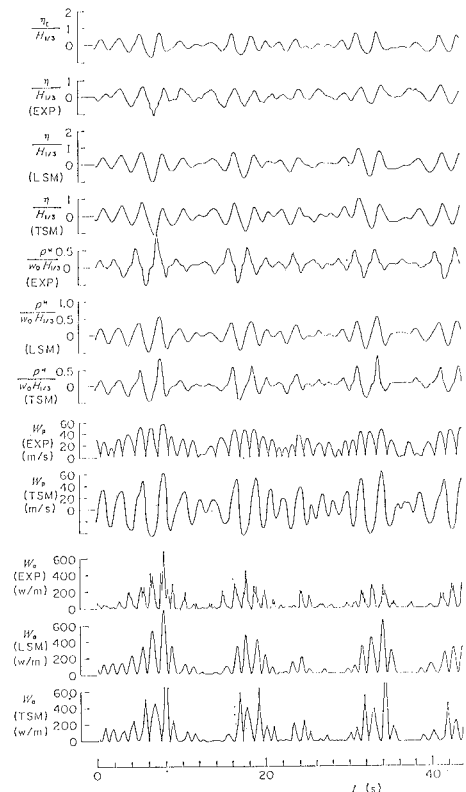


図-2 波形の例

ないために正の側にも出現している。

実験値と計算値を比較すると全般的によく一致していることがわかる。2つの計算法による結果を比較すると両者は全般的によく一致している。ただし、他のケースを含めてみると、圧力や空気パワーのピーク値の線形重ね合わせ法による計算法は、全体的に実験値より小さい。したがって、実験値と比較する場合には、ここでは逐次計算法による計算値を用いることにした。

(2) 空気出力効率と反射率

図-3は横軸に $B/L_{1/3}$ ($h/L_{1/3}$) をとって空気出力効率をプロットしたものである。ただし、 $\varepsilon=1/150$ の場合で $H_{1/3}/L_{1/3}=0.01, 0.02, 0.03$ について示しており、曲線は計算値である。計算値も測定値も $B/L_{1/3}$ が 0.15 程度でピーク値となり、ほぼ一致した値となる。しかし、測定値は $B/L_{1/3}$ が大きいところで計算値より小さく、 $B/L_{1/3}$ が小さいところで計算値より大きくなる。したがって、測定値は $B/L_{1/3}$ が小さくなくてもそれほど効率が小さくならない。これは、図-4 に示す規則波の場合と異なる。規則波の場合には、 β/L が小さいところでは測定値は計算値とほぼ同じか、少し小さい。不規則波の場合、なぜ $B/L_{1/3}$ が小さくなくてもそれほど効率が低下しないかは明確でないが、この事実は実際のケーソンの設計上有利なことである。

図-5は反射率 K_R をプロットしたものであり、曲線はその計算値である。反射率は、 EFF がピークとなる $B/L_{1/3}=0.15$ 付近で最も低く、0.5 程度となる。同図には $E_{loss}=1-K_R-EFF$ によって求めた損失エネルギー比率も示している。これは空気室の前壁の下端に発生する渦などによって消費されるエネルギーであり、理論モデルには含まれていないものである。この損失は $B/L_{1/3}$ が大きいほど大きい。前掲図-3において、 $B/L_{1/3}$ が大きいときに、 EFF の測定値が計算値より小さくなるのはこの損失によるものとも考えられる。

以上の例は $\varepsilon=1/150$ の場合であったが、 $\varepsilon=1/75$ と $1/100$ の場合にも同様の傾向が認められた。ただし、空気出力効率の値は $\varepsilon=1/150$ の場合が最も大きかった。 ε を変化した計算によると、この条件では $\varepsilon=1/200$ 程度で最も効率が高くなるようである。

(3) 圧力、水位、風速そして空気パワーのピーク値

図-6は横軸に有義波高 $H_{1/3}$ をとって圧力のピーク値の $1/3$ 最大値をプロットしたものである。同図には計算値も曲線で示した。計算値は測定値とよく一致しているのがわかる。これを、図は示していないが規則波実験の結果と比べると、 $p_{1/3}$ と $H_{1/3}$ の関係が規則波実験で得た p_m と H の関係によく一致することがわかった。この傾向は、水位のピーク値の場合もほぼ同様であり、また風速のピーク値についても同様であった。図-7は

空気パワーのピーク値の $1/3$ 最大値 $W_{a1/3}$ である。曲線の計算値と実験値はよく一致している。この $W_{a1/3}$ と $H_{1/3}$ の関係も規則波の場合の W_{am} と H の関係によく似ているが、不規則波の場合の方が周期による差は小さく、しかも $H_{1/3}$ に対する $W_{a1/3}$ の値がやや大きいようである。

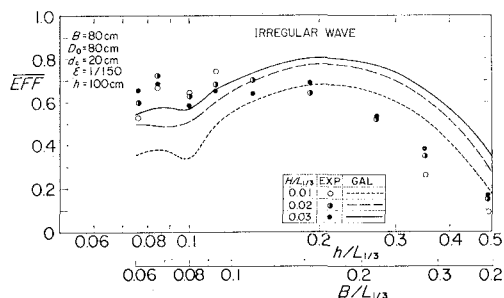


図-3 空気出力効率 (不規則波)

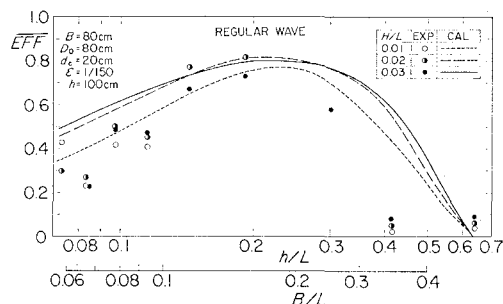


図-4 空気出力効率 (規則波)

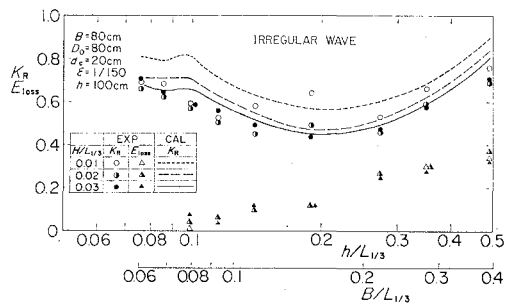


図-5 反射率 (不規則波)

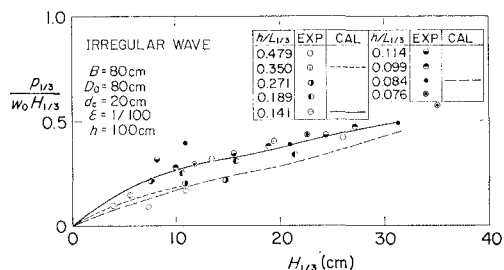


図-6 圧力の $1/3$ 最大ピーク値

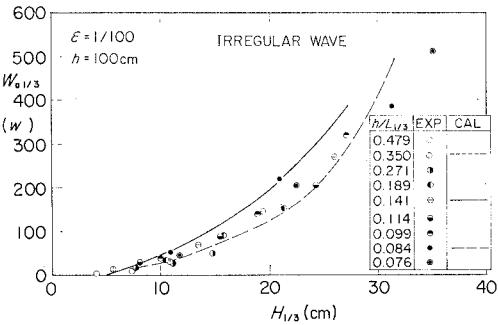


図-7 空気パワーの 1/3 最大ピーク値

(4) 波の不規則性による各ピーク値の変動幅

図-8 は空気パワーの 1/3 最大ピーク値 $W_{a1/3}$ と時間的な平均値 $\bar{W}_a$ の比を示したものである。図中の曲線は計算値である。測定値は通常 7.0 程度であり、計算値とよく一致する。規則波であればピーク値 W_{am} と時間的な平均値との比の測定値は 2.5 程度であり、計算値は 2.0 程度である。7.0 と 2.5 では 3 倍近くも異なり、これが規則波の場合と不規則波の場合と大きく違う点の一

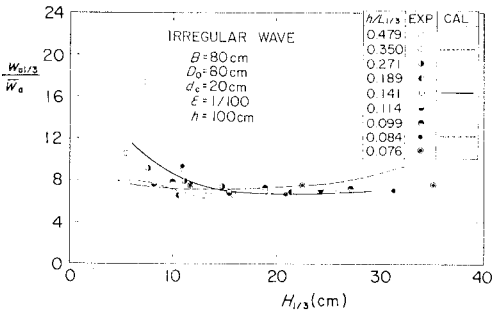


図-8 空気パワーのピーク値の 1/3 最大値と時間的な平均値の比

表-1 ピーク値の代表値間の比

	ϵ	EXP mean	CAL mean	Cal/Exp
W_a	max/1/3	2.181 (0.226)	3.083 (0.863)	1.414
	1/10/1/3	1.477 (0.0662)	1.745 (0.139)	1.181
	mean/1/3	0.528 (0.0417)	0.464 (0.0215)	0.879
p	max/1/3	1.780 (0.211)	2.249 (0.382)	1.263
	1/10/1/3	1.337 (0.0553)	1.525 (0.0973)	1.141
	mean/1/3	0.606 (0.0596)	0.524 (0.0264)	0.865
w_p	max/1/3	1.350 (0.120)	1.527 (0.130)	1.131
	1/10/1/3	1.178 (0.0458)	1.248 (0.0453)	1.059
	mean/1/3	0.721 (0.0246)	0.681 (0.0265)	0.944
η^+	max/1/3	1.413 (0.0723)	1.660 (0.285)	1.175
	1/10/1/3	1.211 (0.0342)	1.327 (0.147)	1.096
	mean/1/3	0.638 (0.0287)	0.558 (0.0434)	0.875

つである。

表-1 は不規則波の場合の各ピーク値の代表値間の比を示すものである。これらの値は、波の条件やノズル比が異なるケースのものの平均値と分散である。ただし、分散の値からわかるように、条件の違いによるばらつきは比較的小さい。測定値をレーリー分布から得られる代表波高の比 $H_{\max}/H_{1/3}=1.59$ (100 波の期待値), $H_{1/10}/H_{1/3}=1.27$, $H_{\text{mean}}/H_{1/3}=0.625$ と比較すると、圧力や空気パワーの変動幅は波高のそれより大きい。一方、水位はほぼ波高と同程度かやや小さく、風速はそれより小さい。測定値と計算値を比べると、全体的に測定値の方が変動幅が大きい。すなわち、計算では不規則波による変動幅をやや誇張する傾向にある。

空気室の設計やタービン・発電機の設計においては、圧力や空気パワーなどの時間的な平均値や 1/3 最大ピーク値だけではなく、その変動幅を知ることは重要である。

5. ま と め

主な結論は以下のとおりである。

- (1) 規則波に対する空気出力理論を拡張し、不規則波に対する 2 つの計算方法を提案した。1 つは基本式を周波数領域で解くものであり、もう 1 つは時間領域で解くものである。2 つの計算法は全体的に実験結果によく一致する。
- (2) 不規則波の場合、比較的周期が長い波でも空気出力効率はそれほど低下せず、規則波の場合と異なる。この理由は明確でないが、空気室の設計上は有利な事実である。
- (3) 空気室の圧力や水位、ノズルの風速や空気パワーなどの一波一波のピーク値の 1/3 最大値の実験値とその計算値はよく一致する。これらの 1/3 最大値と有義波高の関係は、規則波の場合のピーク値と波高の関係とよく一致する。ただし、空気パワーのピーク値は、不規則波の場合やや大きい。
- (4) 空気パワーのピーク値の 1/3 最大値と時間的な平均値との比は 2.0 である。また、圧力と空気パワーの不規則波による変動幅は、その入射波高の変動幅より大きい。一方、風速や水位の変動幅は波高よりも小さい。実験値に比べ計算値はその変動幅をやや誇張する傾向にある。

参 考 文 献

- 1) 小島朗史・鈴木諭司・合田良実: 波力発電ケーソンの空気出力に関する理論および実験, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 638~642, 1984.
- 2) 合田良実: 沿岸波浪の統計的性質, 第 1 回波浪エネルギー利用シンポジウム, pp. 19~31, 1984.