

水中構造物に対する波力推算のための設計波

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	糸洑, 長敬 瀬戸, 雅文 中村, 充
巻/号	56巻9号
掲載ページ	p. 1445-1448
発行年月	1990年9月

水中構造物に対する波力推算のための設計波

糸 洸 長 敬, 瀬 戸 雅 文, 中 村 充, 明 田 定 満

(1990年3月9日受付)

Design Waves for Estimating Wave Forces of Submerged Structures

Chohei Itosu,*¹ Masabumi Seto,*¹ Makoto Nakamura,*¹
and Sadamitsu Aketa*²

The ocean waves have characteristics as a random process. When we design for structures such as breakwaters and harbors, we widely use "the typical wave" as design waves. The typical wave is a single sinusoidal wave and its energy equals to the total energy of the random surface wave.

The wave force acting on submerged structures is caused by the orbital velocity of water particles, and, therefore, the composed velocity of two waves coming from the different directions has to be added by the vectorial addition.

However, the typical wave of scalar composition is generally used as design waves. The total energy of the typical wave is different from the energy due to the velocity of vectorial addition.

In this paper, we theoretically discussed the relation between design wave height on surface structure (H) and that on submerged structure (H_p). we got a formula $H_p = \alpha H$. α is about 0.9 at typhoon.

海の波の工学的研究は表面付近の波の特性に焦点が置かれている。これは対象とする構造物が海面付近のものであり、かつ波の作用は海面近傍が最も強大なためである。しかし、近年の海洋開発の中で水産における魚礁をはじめ、海底あるいは海中に構造物を設置することが多くなっている。これら海中構造物に対する設計波は港湾、漁港、海岸保全などで用いる波を準用してきた。その結果は堤防が被災しても魚礁は安全であったり、多くの例では海中構造物に対する波力はやや過大に見積られていると思われる。この原因はいろいろあろうが本論文ではスペクトル波の代表波について海面付近の波力と海中海底の波力についての相違を明らかにし、設計波の定め方について検討する。

風波のスペクトル

海の波は、周波数および波向に関して不規則であり、これを表現する表示法の一つとしてスペクトル解析法における方向スペクトルが用いられる。これは、種々の方向に伝播する波の重ね合わせとして表現される不規則波

のエネルギー密度を周波数と波向の関数として表したもので、解析および活用の便宜上、周波数スペクトルと方向分布関数の積によって表現されることが多い。周波数スペクトルに関しては Pierson and Moskowitz,¹⁾ Bretschneider,²⁾ 光易ら,^{3,4)} に代表される多くのスペクトル形が提案されており、ほぼ実用に供する程度まで情報が蓄積されている。一方、方向分布関数についても、古くから研究されたものの、精度の高い実測値の蓄積が不十分なこともあってその特性の解明は遅れていた。ところが、近年、計測技術の向上と共に EMLM,⁵⁾ MEP,⁶⁾ など、波高計に流速計、傾斜計などを組み合わせた計測システムを用いることにより比較的高精度で方向スペクトルを推定する方法が開発され、これとともに現地観測も継続的に行われるようになってきた。

我が国で多く用いられているスペクトルをまとめると、周波数スペクトルは Bretschneider, 光易型の (1) 式の分布で、これは有義波高 H_s 、有義周期 T_s の廻りの周波数 f のエネルギー分布を示している。

$$S(f) = 0.258 H_s^2 T_s^2 (T_s f)^{-5} \exp\{-1.03(T_s f)^{-4}\} \quad (1)$$

*¹ 東京水産大学海洋生産学科 (Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108, Japan).

*² 水産工学研究所 (National Research Institute of Fisheries Engineering, Ebikai, Hasaki, Kashima, Ibaraki 314-04, Japan).

また, 方向別エネルギーの分布状態を示す方向分布関数は光易らによれば

$$G(f:\theta) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (2)$$

ここに, θ は主方向から測った成分波の方向, G_0 は G の分布比率を全方向エネルギーを 1 とし正規化するための定数, すなわち

$$\int_{-\pi}^{\pi} G(f:\theta) d\theta = 1$$

S はエネルギーの方向集中度を示し, 光易らの式を合田・鈴木,⁷⁾ は使い易いように (3) 式で与えた。

$$S = \begin{cases} S_m (f/f_p)^5 & f \leq f_p \\ S_m (f/f_p)^{-2.5} & f > f_p \end{cases} \quad (3)$$

ここに, f_p は (1) 式のピーク周波数で

$$f_p = \frac{1}{1.05 T_s} \quad (4)$$

で示される。 S_m は S の最大値で方向集中度指数である。以上をまとめると波の方向スペクトルは

$$S(f:\theta) = S(f)G(f:\theta) \quad (5)$$

となる。

方向スペクトル波の代表波

構造物に作用する波の影響を計算する場合には, 方向スペクトル波の合成値を代表波としてこの代表波について波作用を計算する。⁸⁾ 地形的に波の遮蔽がある場合には入射方向波の合成としている。

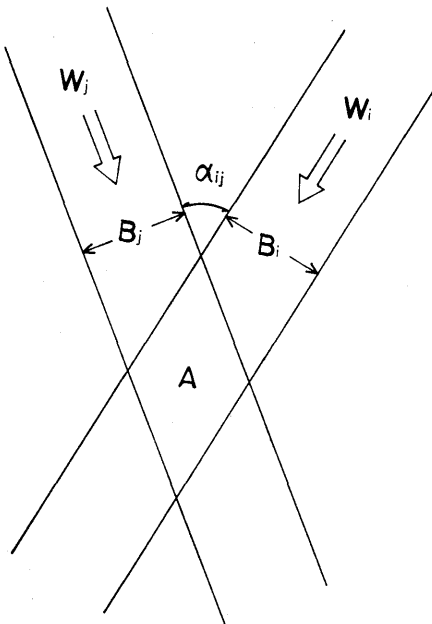


Fig. 1. Energy density at the junction area of two directional waves.

W : Energy flux of progressive wave.

Fig. 1 に示すように 2 方向の波が交差すると交差域では両波は合成されて波高が増大するが, やがて分離し, それぞれの方向に進行する。 α_{ij} なる交角の 2 つの波が交わるとき Fig. 1 で

j 方向エネルギーフラックス

$$W_j B_j = E_j B_j n_j C_j$$

i 方向エネルギーフラックス

$$W_i B_i = E_i B_i n_i C_i$$

ここに W : 単位幅当りのエネルギーフラックス, E : 波のエネルギー密度, B : フラックスの幅, n : エネルギー輸送速度と波速の比, C : 波速である。添字 ij はそれぞれの方向を示す。

交差域 $A (= B_i B_j / \sin \alpha_{ij})$ のエネルギーは逸散のない場合, 保存されて

i 方向波

$$E_i B_i n_i C_i \frac{B_j}{n_j C_j \sin \alpha_{ij}} = E_i A$$

i 方向波も同様に $E_j A$ 。よって, 交差域 A におけるエネルギー密度 E_{ij} はスカラー和として

$$E_{ij} = (E_i A + E_j A) / A = E_i + E_j \quad (6)$$

微小振幅波表示をとれば

$$E = \rho g H^2 / 8$$

ここに, ρ : 海水密度, H : 波高, g : 重力加速度であり, 交差域における代表波高 H_{ij} は

$$H_{ij} = \sqrt{\frac{8}{\rho g} (E_i + E_j)} \quad (7)$$

として示される。

同様にして連続スペクトル波の代表波は

$$H = \sqrt{m_0} \quad (8)$$

$$m_0 = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(f:\theta) d\theta df$$

として定めることができる。(8) 式が現在用いられている代表波の扱い方であり, 方向スペクトルについては実用上, 方向を 3 分割あるいは 7 分割して, それぞれの方向の波のエネルギー和と等値代表波を定めている。

海中構造物におけるスペクトル波の作用

海中構造物に対する波作用は水粒子の軌道運動によるものが最も大きい。この値はスペクトル波においては, 各成分波によって生じる軌道運動流速のスペクトル合成値として評価されよう。このことは (8) 式で扱う表面付近作用のための代表波と区別する必要がある。それは (8) 式の代表波の誘導が方向別波のエネルギーの総和, すなわち, スカラー和に等値なものとして求めているのに対し, 流速はベクトル和として与える必要があることである。

i 方向のエネルギーフラックス W_i は

$$W_i = \frac{\rho g H_i^3}{8} n_i C_i = \frac{\rho g H_i^3 L_i}{8 T_i} n_i e_i$$

$$= \alpha_0 H_i L_i n_i u_i$$

$$\left. \alpha_0 = \frac{\rho g}{8} \frac{\sinh kh}{\pi \cosh k(z+h)} \right\} \quad (9)$$

ここに、 T, L ; 波の周期、波長、 e ; 波の進行方向単位ベクトル、 u ; 流速ベクトル、 k ; 波数 ($2\pi/L$)、 h ; 水深、 z ; 静水面よりの距離 (上向きに正)。

すなわち、エネルギー保存則下における流速ベクトル u_i の合成は W_i の合成値に比例する。よって

$$m_p = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(f; \theta) \cos \theta d\theta df \quad (10)$$

として、軌道運動計算のための代表波高 H_p は

$$\bar{H}_p = \sqrt{m_p} = \sqrt{m_0} \sqrt{\frac{m_p}{m_0}}$$

$$= \alpha_p \bar{H} \quad (11)$$

対応する周期 T_p は (4) 式から

$$T_p = 1.05 T_s \quad (12)$$

数値計算 以上の諸式を用い、(11) 式の $\alpha_p = \sqrt{m_p/m_0}$ の値を求める。

(1) 式は、

$$S(f^*) = 0.258 H_s^2 T_s^{-4} f_p^{-5} f^{*-5}$$

$$\exp\{-1.03(T_s f_p)^{-4} f^{*-4}\} \quad (13)$$

$$= S_0 f^{*-5} \exp(-K f^{*-4})$$

ここに、 $f^* = f/f_p$

$$S_0 = 0.258 H_s^2 T_s^{-4} f_p^{-5}$$

$$= 0.314 H_s^2 f_p^{-1}$$

$$K = 1.03 T_s^{-4} f_p^{-4} = 1.252$$

(5), (2), (13) 式より

$$S(f; \theta) = S_0 f^{*-5} \exp(-K f^{*-4}) G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (14)$$

波の全エネルギー m_0 は、

$$m_0 = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f_p S(f^*; \theta) d\theta df^*$$

$$= S_0 G_0 f_p \left\{ \int_0^1 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f^{*-5} \right.$$

$$\times \exp(-K f^{*-4}) \cos^{2S_m f^{*5}} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta df^*$$

$$+ \int_1^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f^{*-5}$$

$$\times \exp(-K f^{*-4}) \cos^{2.5 S_m f^{*-2.5}} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta df^* \left. \right\} \quad (15)$$

$$m_p = S_0 G_0 f_p \left\{ \int_0^1 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f^{*-5} \exp(-K f^{*-4}) \cos \theta \right.$$

$$\times \cos^{2S_m f^{*5}} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta df^* + \int_1^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f^{*-5}$$

$$\times \exp(-K f^{*-4}) \cdot \cos \theta \cos^{2.5 S_m f^{*-2.5}} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta df^* \left. \right\} \quad (16)$$

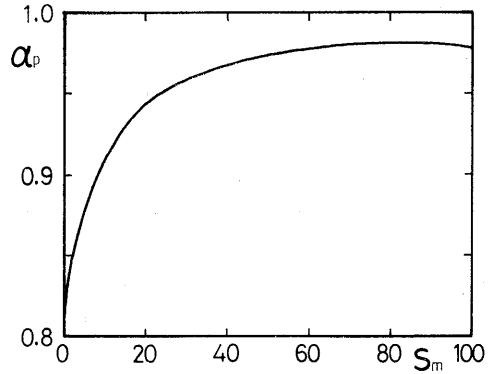


Fig. 2. Relation of α_p and S_m .

α_p : $\sqrt{m_p/m_0}$.

m_p : Total energy of principal directional component on waves.

m_0 : Total energy of waves.

S_m : Concentration coefficient of directional spectrum on waves.

よって

$$\alpha_p = \sqrt{\frac{m_p}{m_0}} = f(S_m)$$

となる。

m_0, m_p の計算は

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta = 2\sqrt{\pi} \frac{\Gamma(S+1/2)}{\Gamma(S+1)}$$

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \theta \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta = 2\sqrt{\pi} \left\{ \frac{2\Gamma(S+3/2)}{\Gamma(S+2)} \right.$$

$$\left. - \frac{\Gamma(S+1/2)}{\Gamma(S+1)} \right\}$$

であることを考慮し、

$$\frac{m_p}{m_0} = \frac{\int_0^1 \beta \gamma_3 df^* + \int_1^\infty \beta \gamma_4 df^*}{\int_0^1 \beta \gamma_1 df^* + \int_1^\infty \beta \gamma_2 df^*} - 1 \quad (18)$$

$$\gamma_1 = \frac{\Gamma(K_1)}{\Gamma(K_1+1/2)}$$

ここに、

$$\gamma_2 = \frac{\Gamma(K_2)}{\Gamma(K_2+1/2)}$$

$$\gamma_3 = \frac{2\Gamma(K_1+1)}{\Gamma(K_1+3/2)}$$

$$\gamma_4 = \frac{2\Gamma(K_2+1)}{\Gamma(K_2+3/2)}$$

$$\beta = f^{*-5} \exp(-K f^{*-4})$$

$$K_1 = S_m f^{*5} + 1/2$$

$$K_2 = S_m f^{*-2.5} + 1/2$$

でこれらの諸式を用いて $\sqrt{m_p/m_0} = \alpha_p$ と S_m との関係を求めることができる。これより海中構造物に作用する波力を推定するための代表波 \bar{H}_p を (11) (12) 式から求めることができる。

Fig. 2 に S_m と α_p の関係を示す。

結 語

海面近傍構造物に働く波の力と海中構造物に働く波の力の相違を方向スペクトル波について検討し、数値解析を行った。その結果を従来の蓄積のある海岸、港湾、船舶などで用いられる設計波 H を基準にとり、これとの相違をパラメータ α_p で示した。Fig. 2 がそれである。図中の波の方向集中度指数 S_m は台風などの条件下では 5~10 であるので、 α_p の値は 0.87~0.91 であり、魚礁等海中構造物に作用する波力を計算する場合の設計波 H_p は H の約 90% にとることができる。ちなみに波力は 2 乗倍で影響するので約 80% となる。

文 献

- 1) W. J. Pierson and Moskowitz: J. Geophys. Res., **69**, 5181-5190 (1964).
- 2) C. L. Bretschneider: Fundamental in Ocean Engineering, Part 7, Ocean Industry Feb., 40-46 (1968).
- 3) 光易恒: 第 17 回海岸工学講演会論文集, 1-7 (1970).
- 4) H. Mituyasu, F. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda, and K. Rikiishi: J. Phys. Oceanogr., **10**, 286-296 (1980).
- 5) 磯部雅彦, 近藤浩右, 堀川清司: 第 31 回海岸工学講演会論文集, 173-177 (1984).
- 6) 小舟浩治, 橋本典明: 第 32 回海岸工学講演会論文集, 159-163 (1985).
- 7) 合田良実, 鈴木康正: 港湾技研資料, **230**, 1-45 (1975).
- 8) 中村 充: 水産の研究, **6**, 104-105 (1987).
- 9) 海岸保全施設築造基準 連絡協議会: 海岸保全施設築造基準解説, 全国海岸協会, 東京, 1987, pp. 3-7.