

円柱波力における波の多方向性の影響

平石 哲也*・富田 康大**・鈴木 康正***

1. はじめに

海の波は、様々な方向へ進む波が重なりあっており、深海域では多方向不規則波としての性質を有している。海の波が浅海域へ伝播してくると、屈折現象により成分波の波向が汀線に直角方向へ揃ってくるので、単一方向波としての性質を有するようになる。従来の棧橋、防波堤、護岸などの海岸構造物は水深が浅い海域に建設されてきたので外力となる波を単一方向波として波力を算定しても支障はなかった。しかし、近年、沖合人工島、海上空港、海洋プラットフォームなどの構造物の建設が大水深海域に計画されており、外力としての波を多方向不規則波として取り扱わなければならないようになった。しかしながら、現行の設計法（日本港湾協会、1989）では多方向不規則波の波力特性は考慮されておらず、早急な検討が必要になっている。

多方向不規則波を外力とした海岸・港湾構造物の模型実験は、近年、大型浮体を対象として行われている（池野ら、1992、竹沢ら、1992）が、波力について実験した例はない。本研究では、多方向不規則波による模型実験を、構造物の設計に応用する試みの一環として、海洋構造物の支柱として多用されている円柱を対象として、波の多方向性を考慮する必要性を検討することを目的とした。円柱に作用する波力については多くの研究成果があり、Goda (1964)は、モリソン式(たとえば、水村、1992)による計算結果により規則波による波力を推定し、その計算図表を提案している。石田 (1991)は、波力の発生機構を明確にし、KC数と抗力係数の関係を示している。また、設計において重要な問題となる衝撃波力については樫木・後野ら (1989)、谷本・高橋ら (1986)の研究がある。これらの小口径の円柱に対する従来の実験は単一方向不規則波中においてなされたもので、波向方向以外の波力成分は考慮されていない。本研究では、多方向不規則波を作用させて円柱に働く波力を測定し、波の多方向性が波力にどのような影響を及ぼすかを検討した。ま

た、多方向不規則波中における波力の有義値を推定する近似式を提案し、その妥当性を検討した。

2. 実験の内容と結果

(1) 円柱模型の形状と実験方法

図-1は実験装置の配置図を示す。実験は全幅28mの多方向不規則波造波装置を設置した平面水槽で行った。造波機は、幅80cmの造波板35枚から成る。造波機中央より4m離れた点に、相互に1m離して、対象とする円柱模型と4本の波高計からなるアレイを設置した。水槽の造波装置前面および側面は、消波材を充填したステンレス性の箱を並べた消波構造になり、反射波の発生を防いでいる。実験では、造波装置前面の波高計アレイの中の2本のデータを用いて作用波の入射・反射波測定を行い、造波信号として与える波高値を設定した後に、円柱模型を設置し、波力および作用波の方向スペクトルの測定を行った。図-2に円柱模型の詳細を示す。円柱模型は、3成分分力計(直径12cm、高さ12cm)に、直径 D 、高さ L_D および肉厚 t が、それぞれ11cm、60cmおよび5mmの亚克力円筒を取り付けたものである。分力計で測定できる波力は水平力 F_x, F_y 、 y 軸回りのモーメント F_z の3成分である。ここでは、作用波の進行方向を x とし、 y を、それに対して横方向の成分とした。波力解析は、水平力(F_x, F_y)のみを行い、モーメントの検討はしていない。実験におけるデータのサンプリング間隔は、0.025sで、240秒間のデータを測定して解析を行った。

実験における作用波は、Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを有する単一方向不規則波と多方向不規則

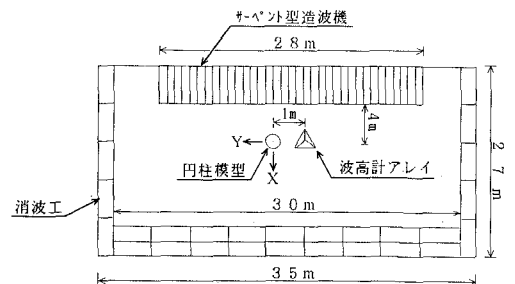


図-1 実験水槽における配置

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官

** 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室

*** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長

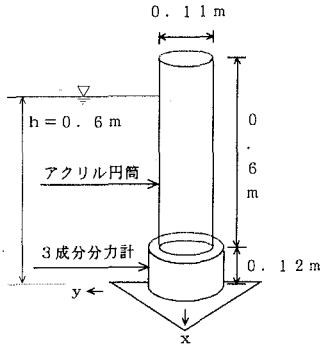


図-2 模型円柱の外観

波とした。有義波高 $H_{1/3}$ は 5, 8, 10 cm, 有義波周期 $T_{1/3}$ は 0.9, 1.0, 1.1 s とそれぞれ 3 段階に変化させ、それらを組み合わせたものを作用させた。多方向不規則波の方向関数は光易型とし、合田・鈴木 (1975) が提案した方向集中度パラメータ S_{max} を 10, 25, 75 に変化させた。なお、以下において、 $S_{max}=999$ は単一方向波のケースであることを示す。主波向は、全ケースとも造波機面に対して直方向である。また、本実験では、各ケースについて 2 種類の波群を作用させ、その解析結果の平均値を各ケースの測定結果とした。

図-3 および 4 は、それぞれ実験波の周波数スペクトルと方向分布関数を示す。図-3 に示すように、水槽内の実験波の周波数スペクトルは、ピークの値が目標値より高いものの、全体として形状が相似しており、目標とする周波数スペクトルが再現されている。黒丸で示す単一方向波のスペクトルと白丸で示す多方向波のスペクトルはよく一致しており、単一方向波と多方向波のエネルギーの周波数分布には違いは見られない。図-4 は、ピーク周波数 f_p 近傍の周波数帯における方向関数の分布形で、各図の下端に、造波信号作成時に入力した方向集中度パラメータ S_{max} を示す。方向分布の解析法はベイジアンモデル (橋本, 1992) を用いた。各図の縦軸は方向関数の値である。横軸は角度で、 90° が造波機面に対して直方向であることを示す。各図の細実線は $S_{max}=10\sim 100$ に対して計算される理論方向関数の分布形である。 $S_{max}=999$ の場合、造波された波の方向集中度は高く、分布形は $S_{max}=100$ の理論値より鋭くなっており、水槽内に、正確に単一方向波が造波されていることがわかる。 $S_{max}=10\sim 75$ で示された多方向波の実験結果は、目標とする理論分布とほぼ一致しており、水槽内において、目標とする多方向不規則波が精度よく造波されていることがわかる。なお、ピークの角度が数度ずれているのは、波高計アレイ設置時の誤差によるものと思われる。

測定した波力変動の時系列を調べると、大きな波が作用すると同時に大きな波力が作用し、作用波形と相似し

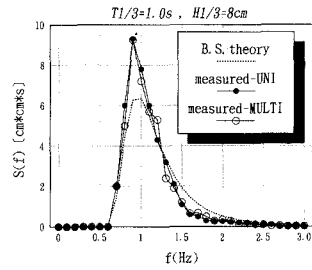


図-3 実験波の周波数スペクトル

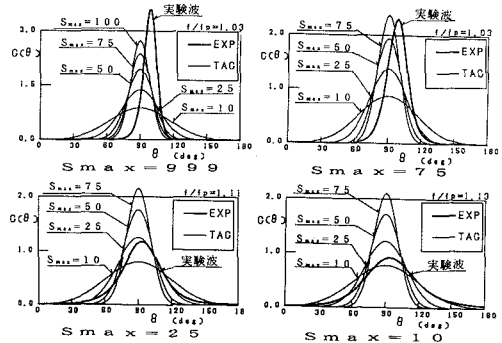


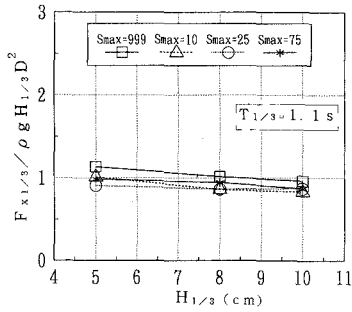
図-4 実験波の方向分布関数

た張力波形が得られた。そこで、波力データの解析にあたっては、波の解析と同様にゼロアップクロス法で個々の波を定義した。そして正側のピーク張力 P_U を整理し、大きい順に並べたもののうち、上から 1/3 に含まれる P_U 値の平均を有義波力 ($F_{x1/3}$, $F_{y1/3}$) とした。

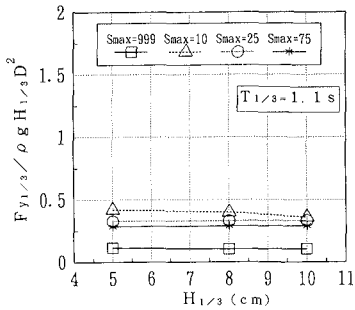
(2) 多方向波による波力の特性

波力を解析したところ、全ケースとも、波群 1 と波群 2 の測定値の差が小さかったので、波群 1 および波群 2 における計測値の平均値をケースの代表とした。図-5 (1) および (2) はそれぞれ F_x および F_y の有義値を、波高と円柱直径で無次元化して示したものである。図-5 は、有義波周期 $T_{1/3}=1.1$ s の結果を示している。波高が大きくなっても、無次元波高はほとんど変化せず、波力は波高とほぼ線形の関係にあり、波高で除することが妥当であることわかる。モリソン式の波力のうち、慣性力は波高に比例するから、本実験条件は慣性力が卓越する領域に含まれており、波高に対して線形化できる。

図-6 は、波高レベルの異なる実験結果を平均して、 F_x および F_y の方向集中度に対する変化を示したものである。本実験の場合に、周期が異なっても波力に大きな変化がないのは、周期の変化幅が小さいので、周期による波力の差が生じなかったためと思われる。主波向方向の F_x は、波の方向集中度が高くなると徐々に増加し、 $S_{max}=10$ のときには、無次元波力が 0.9 であったもの



(1) x方向波力



(2) y方向波力

図-5 波高による作用波力の変化

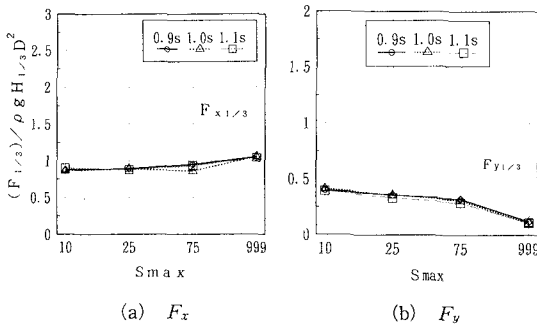


図-6 方向集中度に対する波力の変化

が、単一方向波になると1.1になる。一方、 F_y は、方向集中度が高くなると減少する。その無次元波力は、 $S_{max} = 10$ の場合には0.4程度であるが、単一方向波の場合には0.15程度に小さくなる。

図-7は、各タイムステップにおいて、分力計のxおよびy方向の計測値の2乗和の平方根を取り、統計処理をして求めた合力の実験結果である。合力の有義値は、方向集中度が高くなるとわずかに増加する傾向を示す。したがって、単一方向波の方が全波力はわずかに大きくなるので、現行の波力算定法を用いると、多方向波力については、若干過大な値が得られているものと思われる。

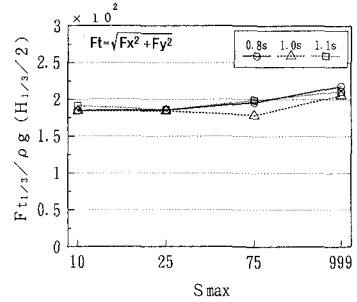


図-7 周期による実験合力の変化

3. 波力算定法とその妥当性

(1) 計算法

小口径の直立円柱単位長さあたりに作用する抗力 F_D と慣性力 F_I は次式で示される。

$$F_D = \frac{dF_D}{dz} = C_D \frac{\rho D}{2} \left(\frac{H\sigma}{2} \right)^2 \left[\frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \right]^2 \cdot \cos \sigma t |\cos \sigma t| \dots\dots\dots (1)$$

$$F_I = -\frac{dF_I}{dz} = -C_M \frac{\rho \pi D^2}{2} \left(\frac{H\sigma^2}{2} \right) \cdot \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \sin \sigma t \dots\dots\dots (2)$$

水平方向の波力は、式(1)および(2)を水深方向に積分すると、次式のように表される。

$$\left\{ \begin{aligned} F_T &= \int_{-h_0}^{\zeta} (dF_D + dF_I) = F_D + F_I \\ F_D &= \rho g \frac{C_D}{2} \rho D \left(\frac{H}{2} \right)^2 \frac{gkh}{\sinh 2kh} \cos \sigma t |\cos \sigma t| \\ &\quad \times \left[\frac{1}{2kh} (\sinh 2k(\zeta+h) - \sinh 2k(h-h_0)) + \frac{\zeta+h_0}{h} \right] \dots\dots (3) \\ F_I &= -C_M \rho g \frac{\pi}{4} D^2 \frac{H}{2} \frac{\sin \sigma t}{\cosh kh} [\sinh k(\zeta+h) - \sinh k(h-h_0)] \end{aligned} \right.$$

ここで、 F_D と F_I はそれぞれ円柱に作用する全抗力と全慣性力である。 $H, \sigma, \rho, \zeta, k, h$ はそれぞれ波高、角周波数、水の密度、静水面を0としたときの水面変位、波数および水深である。 D は円柱の直径で、 h_0 は円柱の設置水深である。通常、 h と h_0 は一致しているが、波力センサー面が海底面に設置しておらず、海底面から離れているので、センサー設置水深 h_0 から上方の波力だけが測定される。 C_D および C_M はそれぞれ抗力および慣性力係数で、ここでは、現行の設計(日本港湾協会, 1989)にしたがって、直径が波長の1/10以下の場合の標準値である1.17および2を用いる。

多方向不規則波は、シングルサンメーション法(高山・

平石ら, 1989) によって, 異なる振幅, 周期および波向を持つ成分波を \$N_s\$ 個重ね合わせて作成できるものとする. \$i\$ 番目の成分波の波向を \$\theta_i\$ とする. 波向 \$\theta_i\$ の成分波による \$x\$ 軸方向の波力成分のうち, 抗力によるものは次式で示される.

$$F_{Dxi} - \beta_i a_i \cos \theta_i (\cos^* \sigma_i t) \dots \dots \dots (4)$$

ここで,

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_i &= \rho g \frac{C_D}{2} D a_i \frac{k_i h}{\sinh 2k_i h} \left\{ \frac{1}{2k_i h} (\sinh 2k_i (\zeta + h)) \right. \\ &\quad \left. - \sinh 2k_i (h - h_o) \right\} \dots \dots \dots (5) \\ \cos^* \sigma_i t &= \cos \sigma_i t |\cos \sigma_i t| \end{aligned} \right.$$

である. 慣性力によるものは, 次のようになる.

$$F_{Ixi} = \alpha_i a_i \cos \theta_i (-\sin \sigma_i t) \dots \dots \dots (6)$$

ここで,

$$\alpha_i = C_M \rho g \frac{\pi}{4} D^2 \frac{1}{\cosh k_i h} \cdot \{\sinh k_i (h + \zeta) - \sinh k_i (h - h_o)\} \dots \dots \dots (7)$$

である. 本実験条件においては, 抗力は慣性力に比べて小さいので, \$\cos^* \sigma_i t\$ を \$\cos \sigma_i t\$ で近似すると, \$i\$ 番目の成分波による \$x\$ 軸方向の全波力は次式で表される.

$$\left\{ \begin{aligned} F_{Tx_i} &= F_{Dxi} + F_{Ixi} \\ &= \sqrt{\beta_i^2 + \alpha_i^2} a_i \cos \theta_i \sin(\sigma_i t + \epsilon_i^*) \dots \dots \dots (8) \\ \epsilon_i^* &= \arctan(-\beta_i/\alpha_i) \end{aligned} \right.$$

同様に, \$i\$ 番目の成分波による \$y\$ 軸方向の全波力は次式で表される.

$$\begin{aligned} F_{Ty_i} &= F_{Dyi} + F_{Iyi} \\ &= \sqrt{\beta_i^2 + \alpha_i^2} a_i \sin \theta_i \sin(\sigma_i t + \epsilon_i^*) \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

式(8)および(9)に示されるように, 波力振幅は波振幅に比例するものと近似できるので, 波力振幅の \$x\$ および \$y\$ 軸方向の有義値は次式で表される.

$$\left\{ \begin{aligned} F_{x1/3} &= \left[\sum_{i=1}^{N_s} \frac{S(f_i) \Delta f_i}{m_0} \bar{\alpha}_{xi}^2 \right]^{1/2} \frac{H_{1/3}}{2} \dots \dots \dots (10) \\ F_{y1/3} &= \left[\sum_{i=1}^{N_s} \frac{S(f_i) \Delta f_i}{m_0} \bar{\alpha}_{yi}^2 \right]^{1/2} \frac{H_{1/3}}{2} \end{aligned} \right.$$

ここで, \$f_i\$ および \$S(f_i)\$ は \$i\$ 番目の成分波の周波数および周波数スペクトルである. また,

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\alpha}_{xi} &= \sqrt{\beta_i^2 + \alpha_i^2} \cos \theta_i \dots \dots \dots (11) \\ \bar{\alpha}_{yi} &= \sqrt{\beta_i^2 + \alpha_i^2} \sin \theta_i \end{aligned} \right.$$

である. 波力振幅の最大値は, 水位上昇 \$\zeta\$ が上昇したときに生じるため, \$\alpha_i\$ および \$\beta_i\$ の計算において, ピーク周波数近傍の周波数帯に含まれる周波数を有する成分波においては, \$\zeta\$ を \$H_{1/3}/2\$ で代表させた. ピーク周波数 \$f_p\$ の近傍とは, 波の全エネルギーの 80% が含まれる \$0.8f_p\$

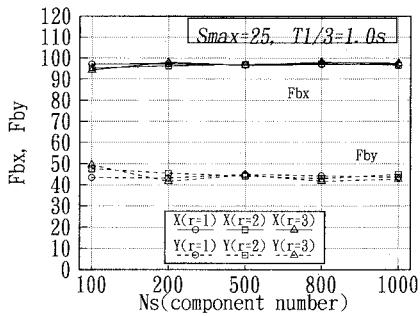


図-8 成分波数による波力応答係数の変化

~1.65 \$f_p\$ に相当する.

多方向不規則波をシミュレートする場合には, 成分波の位相および波向を決定するための乱数列の種類および重ね合わせる成分波数の数によって計算結果が異なる可能性がある (高山・平石ら, 1989). そこで, 上記に示した計算を異なる乱数列を用いて行った. 図-8 は, 乱数列を 3 種類に変化させ, 各乱数について, 成分波数 \$N_s\$ を 100 から 1000 まで変化させた場合について, 波力振幅の有義値を半波高で除した値 \$F_{bx}\$ および \$F_{by}\$ を示したものである. なお, 図の計算においては有義波周期 \$T_{1/3}\$, \$h\$ および \$h_o\$ は, それぞれ 1 s, 60 cm および 40 cm とした. 方向集中度パラメータ \$S_{max}\$ は 25 で, 円柱の直径 \$D\$ は 10 cm である. 図において, \$r\$ は乱数の種類を示したもので, 1 から 3 まで 3 種類を比較した. 縦軸に波力応答係数 \$F_{bx}\$ および \$F_{by}\$ を示した. 図に示すように, 成分波数が 200 程度であれば波力応答係数は変動しているが, 成分波数が 500 以上になると, 波力応答係数は, 成分波数によらず一定である. また, 乱数列が変化しても, 応答係数の値は, 成分波数が 500 以上であればほとんど変化しない. そこで, シミュレーションに用いる成分波数 \$N_s\$ を 500 としておけば, 乱数列を任意に与えることができる.

(2) 計算値と実験値の比較

図-9 は合力 \$F_t\$ に関する計算値と実験値の比較を示す. 縦軸は, 合力 \$F_t\$ の有義値を有義波高の \$1/2(a_{1/3}) \times \rho g\$ で無次元化したものである. 計算値は, 方向集中度パラメータ \$S_{max}\$ が変化しても一定になり, その大きさは実験値とよく一致する.

図-10 は, 合力 \$F_t\$ の有義値に対する, \$x\$ および \$y\$ 方向の有義波力の比を示したものである. 方向集中度パラメータ \$S_{max}\$ が大きくなり, 波の方向集中度が高くなるにつれて実験値と計算値は同じ傾向を示し, \$F_{x1/3}\$ は増加する. 主波向に対して横方向になる, \$y\$ 方向の有義波力 \$F_{y1/3}\$ は, 方向集中度が高くなると, 小さくなり, 計算値は実験値とよく一致する. なお, \$S_{max}=999\$ すなわち単一方向不規則波の場合には, 計算では, \$F_{y1/3}\$ は 0 になるが, 実験では 0.1 程度の値を示す. 実験値が 0 にならないの

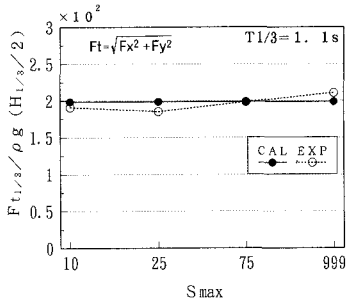


図-9 円柱に作用する全波力における計算値と実験値

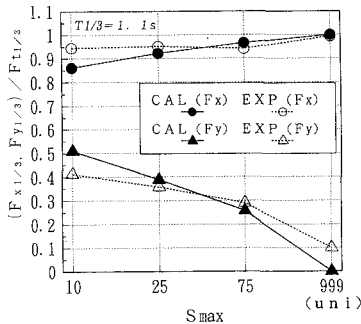


図-10 円柱に作用する水平2成分波力における計算値と実験値の比較

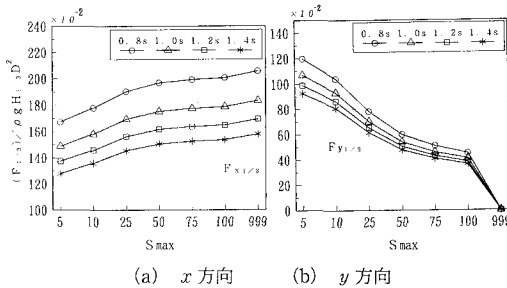


図-11 方向集中度に対する円柱波力の計算値の変化

は、平面水槽内では、単一方向波を起こしても、波向以外の方向へも、エネルギーが分散するためである。このように、シングルサンメーション法によって、成分波による波力を線形に重ね合わせると、多方向波による水平波力を推定できる。

図-11(a) および (b) は、周期および方向集中度の変化に対する、 x 方向および y 方向の有義波力の計算値を示したものである。縦軸は、有義張力を $\rho g H_{1/3} D^2$ で除した値である。ここでは、円柱は水底面に設置されており、円柱直径および水深は 10 cm および 60 cm とした。周期 0.8~1.4 s のいずれの場合にも波の方向集中度が高くなると F_x は徐々に増加し、 $S_{max}=5$ の場合と、単一方向波の場合を比較すると x 方向すなわち主波方向の波力は 2 割程度増加している。したがって、主波方向の波力

については、単一方向波が最も厳しい条件となる。図-11(b) の y 方向の波力を調べると、波の方向集中度が高くなるにしたがって主波向に対して直角方向の波力成分は急激に減少する。単一方向波では、 y 方向成分は 0 であるのに対して、 $S_{max}=5$ の場合には、90~120 程度になる。したがって、多方向不規則波が作用する場合には、主波向方向の波力だけでなく、主波向に対して直角方向の力を考慮しておく必要がある。また、 y 方向成分は方向集中度によって大きく変化するので、海域における波の多方向性を正確に推定しておく必要がある。

4. あとがき

本実験では、多方向不規則波中に設置された円柱に作用する水平力を測定し、多方向不規則波中においては、主波向方向の波力成分だけでなく、主波向に対して横方向へも波力成分が生じることを明らかにした。そして、それらの波力成分の大きさを推定する手法を提案し、それが妥当性を有することを示した。今後は、本実験および計算で得られた知見を実際の構造物の設計へ適用していくつもりである。たとえば、釜石港に建設されている湾口防波堤は開口部の水深が 60 m であり、作用する波は多方向波であると考えられる。また、使用しているケーソンはスリット式であり、スリット部材に作用する波力の検討が必要である。そこで、開口部の堤頭函のスリット部の設計においては、多方向不規則波を作用させて部材波力を測定し、波の多方向性が波力に及ぼす影響を検討しておかなければならない。

参考文献

池野正明・鹿島達一 (1992): 多方向不規則波による 2 基プラント動揺の相互干渉, 海岸工学論文集, Vol. 39, pp. 806-810.
 石田 啓 (1991): 柱体の波力の発生機構と波浪振動, 水工学に関する夏期講習会講義集, B-1.
 合田良実・鈴木康正 (1975): 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 155, 33 p.
 榎木 亨・後野正雄・野崎智文 (1989): 円柱に作用する碎波衝撃波力の数値的検討, 海岸工学論文集, Vol. 36, pp. 714-718.
 高山知司・平石哲也・立石義博 (1989): 多方向不規則波の造波信号発生法に関する検討, 海岸工学論文集, Vol. 36, pp. 153-157.
 竹沢誠二・平山次清・上野誠也・Akin Tuzcuoglu・梶原洋昭 (1992): 方向スペクトル波中の超大型海洋構造物応答実験 (その 2), 日本造船学会論文集, Vol. 172, pp. 57-68.
 谷本勝利・高橋重雄・金子忠男・塩田啓介・小蔵敏一郎 (1986): 円柱に働く衝撃碎波力に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 25, No. 2, pp. 29-87.
 日本港湾協会 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (改訂版), pp. 136-138.
 橋本典明 (1992): 海洋波の方向スペクトルの推定法に関する研究, 港湾技研資料, No. 722, 118 p.
 水村和正 (1992): 海岸海洋工学, 共立出版, pp. 158-163.
 Goda Y. (1964): Wave force on a vertical circular cylinder: Experiments and a proposed method of wave force computation, Rep. of Port and Harbour Tech. Res. Inst., No. 8, pp. 1-74.