II-154　大口径円筒構造物に働く不規則波力　ー方向分散性の影響ー

清水建設(株) 技術研究所 (正) 平山彰彦　　同 大崎研究室 (正) 清川哲志

1. はじめに　　不規則な海の波を評価するのに、波の周波数不規則性とエネルギーの方向分散性の両方を考える必要があることはすでに多くの文献で述べられており[1]、港湾における波の屈折·回折計算などでも波の方向分散を考慮した計算が行われている。しかしながら、構造物に働く波力計算は単に周波数不規則性のみを考慮するにとどまっている。方向分散性を考慮しないということは、実際には種々の方向に分散している波のエネルギーを一方向に集中化して負荷することを意味しており、設計的に過大に外力を評価することになる。実際に、北海を始めとする大型海洋構造物の設計波の諸元から波の方向集中度パラメータS_{max}を求めてみると、2程度になり、強い方向分散性を持つ波を対象にしていることがわかる。したがって、方向分散性の影響を定量的に把握しておくことは設計上重要なことと考えられる。そこで本論文では、円筒構造物を例にとり波の方向分散性を考慮した波力計算を行いその影響を検討する。

2.方向分散性を考慮した不規則波力[2]　　波が微小振幅波の重ね合わせで表現できる場合、波の不規則変動に対しスペクトル理論が適用できる。伝達関数にMacCamy·Fuchsの円筒に関する厳密解、方向関数に光易型を用い、波の·エネルギーの分布範囲を$-\pi/2\leq\theta\leq\pi/2$としてx方向成分を考えると、円筒に働く波力の周波数スペクトルS_{FX}が次式により求まる。

$$S_{FX}(f)=|K_{FF}(f)|^2 S(f)\, G_0\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\cos^2\theta\,\cos^{2s}\left(\frac{\theta}{2}\right)d\theta \qquad \cdots\cdots(1)$$

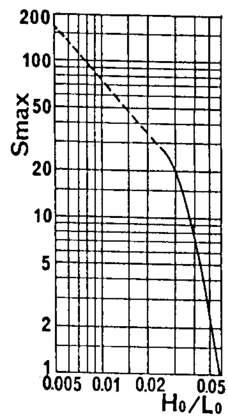
$$K_{FF}(f)=4\rho g\frac{1}{k^2}\tanh kh\left[\{J_1'(kD/2)\}^2+\{Y_1'(kD/2)\}^2\right]^{-1/2} \qquad \cdots\cdots(2)$$

ここに、K_{FF}: 波力の伝達関数、G_0:光易の方向関数の正規化係数、S:周波数スペクトル、s:方向集中度パラメータで、s の最大値S_{max}は図－1のように沖波の波形勾配より決めることができる[3]。式(2)は文献に詳しいので説明を省く。式(1)の積分を実行し整理すると次式になる。

$$S_{FX}(f)=|K_{FF}(f)|^2 S(f)\,\alpha(s) \qquad \cdots\cdots(3)$$

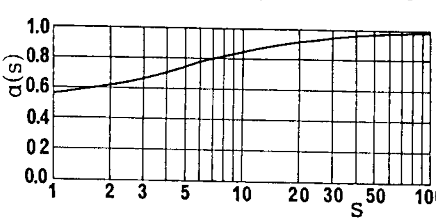
$$\alpha(s)=\{4Z(s+2)-4Z(s+1)+Z(s)\}/Z(s) \qquad \cdots\cdots(4)$$

$$Z(s)=\left\{\sum_{r=0}^{s-1}\frac{\Gamma(2s+1)}{\Gamma(r+1)\Gamma(2s-r+1)}\frac{\sin\{(s-r)\pi/2\}}{s-r}+\frac{\pi}{4}\frac{\Gamma(2s+1)}{\Gamma^2(s+1)}\right\}\frac{1}{2^{2s-1}} \qquad \cdots\cdots(5)$$



図－1　波形勾配によるSmaxの推定図[3]

ここに、Γはガンマ関数、α(s)は式(3)から分かるように波力の周波数スペクトルに及ぼす波の方向分散性の影響を決定することから方向分散係数と呼ぶことにする。このα(s)は一般に$0.5\leq\alpha(s)\leq1$の範囲にあり、方向分散が大きい場合すなわちsが小さい程α(s)は小さくなる。逆にsが大きくなる程α(s)は1に近づき波の方向分散は小さくなる。この特性を示すと図－2のようである。図から分かるように$s=\infty$の時$\alpha(s)=1$となり波の方向分散は無くなり波は一方向に入射する。従来の不規則波力の計算では$\alpha(s)=1$,すなわち波の周波数不規則性のみを考慮していたわけで、波の方向分散性も考慮することによって当然ながら波力は小さくなる。さて、波力の周波数スペクトルが得られるとレーリー分布に基づく確率計算より波力の代表値が次式により求まる。



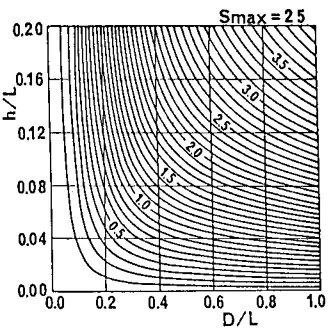
図－2　方向分散係数

$$F=c\sqrt{(m_F)_0}\ ,\qquad (m_F)_0=\int_0^\infty S_{FX}(f)\,df \qquad \cdots\cdots(6)$$

ここに、cは求める波力の値に応じて決まる係数で、ゼロアップクロス波力振幅中の1/3最大値$F_{1/3}$の場合$c=2.002$,平均値$\bar{F}$の場合$c=1.253$である。

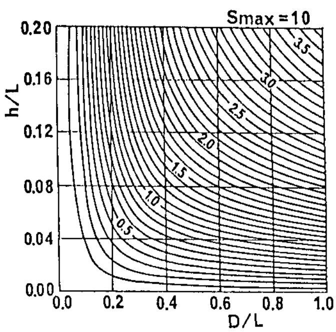
3.計算結果　　周波数スペクトルとしてBretschneider-光易型を用いて式(6)により波力を計算した。図－3~5は無次元化した等波力線を示しており、F(25),F(10),F(2.2)はそれぞれ$S_{max}=25,10,2.2$の時の円筒に働く全波力である。横軸は構造物の直径Dと波長Lの比D/L,縦軸は水深hと波長の比h/Lである。図－6~8は方向分散性を考慮

したことによる波力の低減率を示しておりF(∞)は周波数不規則性のみを考慮した場合の波力である。図－6はS_{max}=25,すなわちうねりの場合で方向分散性を考慮することにより最大10%程度波力が低減することが分かる。図－7はS_{max}=10,すなわち風波の場合で同様に波力は最大17%程度低減する。図－8はS_{max}=2.2,すなわち$T_{1/3}$=11.0,$H_{1/3}$=10.0といった暴風域の波に対応する場合で、最大25%程度低減することが分かる。ただし、S_{max}=2.2という値については、図－1の基礎となる観測値にばらつきがあるため、その決定には慎重を期する必要がある。しかしながら、いずれにしても一般の大型海洋構造物の設計波は風波の領域にあり、方向分散性の影響を強く受けるため、従来の方向分散性を考慮しない波力解析では約20%程度のオーダーで、過大に波力を見積もっていたことになる。しかも、通常の設計基準によれば得られた値にさらに1.3という荷重係数をかけることになっているので2重に安全率を見込むことになり、経済設計の点でも問題があるように思われる。もちろん、計算結果からすぐに設計波力を減らすことはできず、さらに実証的に検討していくことが必要であるが、少なくとも現在までに明らかになっていることを組み合わせて計算すると、その結果として以上のことがでてくるということで、今後、設計基準の見直し等の検討の余地があるということがいえよう。



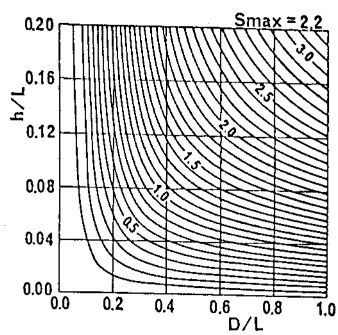
図－3 円筒に働く全波力：

$$\frac{F(25)}{\rho \cdot C \cdot H_{1/3} \cdot L^2} \times 10^2$$



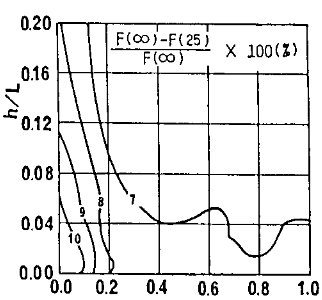
図－4 円筒に働く全波力：

$$\frac{F(10)}{\rho \cdot C \cdot H_{1/3} \cdot L^2} \times 10^2$$

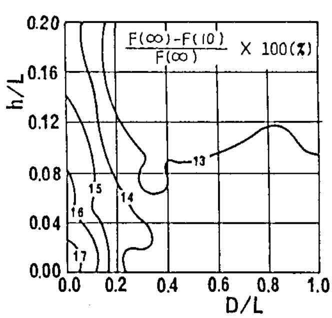


図－5 円筒に働く全波力：

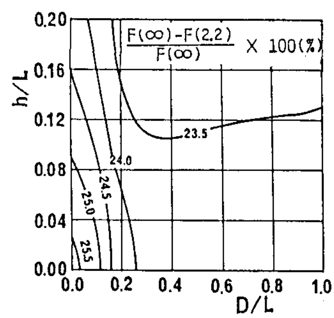
$$\frac{F(2.2)}{\rho \cdot C \cdot H_{1/3} \cdot L^2} \times 10^2$$



図－6 波力の低減率



図－7 波力の低減率



図－8 波力の低減率

4. おわりに　波の周波数不規則性に加え方向分散性も考慮することで、たとえばS_{max}=2.2の場合、波力が最大で25%程度低減することが分かった。これは、通常の大型海洋構造物の設計波に対応している。したがって、方向分散性を考慮することで設計波力の大きな低減が期待できるといえよう。　しかし、この計算値を検証するための実験値は今のところ無く、また、入射波の方向スペクトルと対応づけた波力スペクトルの観測例も著者らの知る限り無い。計算結果の妥当性を検証し、合理的な波力解析法を確立していくためには、今後この方面での実証データの蓄積が望まれる。なお著者らは、今後、円筒に限らず他の形状の構造物に働く波力についても、波の方向分散性を考慮して求めていきたいと考えており、現在、解析法を検討しているところである。

参考文献

1)　例えば、日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準·同解説、運輸省港湾局監修、 p.2－33,1979.
2)　合田良実:続水理学(林泰造、本間仁編),丸善株式会社、pp.167～168,1980.
3)　合田良実·鈴木康正: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.230,1975.