I-226　海洋構造物の動特性に関する基礎的研究

東京大学工学部　正会員　奥村 敏恵

東京大学工学部　正会員 ○西岡　隆

海洋構造物を設計する上で重要な問題の一つは、波浪による外力を正確に把握して設計に用いることであろう。しかし波浪外力の算定においては、外力それ自身が構造物の応答に影響される場合があり、たとえ同一の波浪が作用する時でも構造物の特性によっては作用する外力が異なってくることが考えられる。しかし海洋構造物を設計する立場からは、個々の構造物に対していたずらに複雑な応答計算を行うことは望ましいことではない。そこで本研究では一定のスペクトル分布をもつ波浪が、種々の構造形式をもつ海洋構造物に作用した時の応答を算定し、構造物の特性が波力や波圧に与える影響を調べ、設計の立場から見た外力の適切な算定方法を検討した。

設計に用いられる波高のスペクトル分布が既知であるとすれば、任意の水深における水粒子の速度$\mathbb{V}$はAiryの微少振巾波理論によって近似できる。一方構造物と水粒子の相対変位を$\mathbb{X}$とすれば、波浪による外力はMorisonの公式

$$\mathbb{F} = C_D \frac{\rho D}{2} \dot{\mathbb{X}} |\dot{\mathbb{X}}| + C_M \frac{\rho \pi D^2}{4} \ddot{\mathbb{X}} \qquad (1)$$

で与えられるから、海洋構造物の運動方程式は

$$[\overline{\mathbb{M}}]\ddot{\mathbb{X}} + [\mathbb{C}]\dot{\mathbb{X}} + [\mathbb{C}_D]\dot{\mathbb{X}}|\dot{\mathbb{X}}| + [\mathbb{K}]\mathbb{X} = [\mathbb{M}]\ddot{\mathbb{V}} + [\mathbb{C}]\dot{\mathbb{V}} + [\mathbb{K}]\mathbb{V} \qquad (2)$$

ただし、$[\mathbb{M}]$, $[\mathbb{C}]$, $[\mathbb{K}]$はそれぞれ構造物の質量、減衰、剛性マトリックスで、$[\overline{\mathbb{M}}]$, $[\overline{\mathbb{C}_D}]$はそれぞれ付加質量を含む質量マトリックス、抗力を表わすマトリックスである。(2)式において左辺第三項の非線形項があるために問題の取り扱いが困難になる。一般に不規則な外力がガウス過程であれば、線形な系では応答もガウス過程であるが、系に非線形の要素が含まれると、出力はもはやガウス過程とはならない。(2)式を解く方法の一つとして、Penzien[1]らの行なった等価線形化法があげられるが、ここでは確率統計論にもとずく摂動法によって解くことにした。[2]

(2)式において左辺第三項の非線形項をのぞいた解を第一次近似$\mathbb{X}_0$とすれば、第二次近似$\mathbb{X}_1$は、摂動法により$\mathbb{X}_1 = \mathbb{X}_0 - \mathbb{X}_1'$とおくと

$$\mathbb{X}_1' = \int_{-\infty}^{\infty} \{ h_{\mathbb{X}_0}(t-\tau) \} [\overline{\mathbb{C}_0}]\, \dot{\mathbb{X}}_0 |\dot{\mathbb{X}}_0|\, d\tau \qquad (3)$$

で与えられる。ここで$h_{\mathbb{X}_0}(t)$は構造物の単位衝撃応答である。$\mathbb{X}_1$の自己相関関数が求められ、スペクトルが相関関数のフーリエ変換であるという定義がこの場合にも成り立つと仮定すれば、$\mathbb{X}_1$の応答スペクトル$S_{\mathbb{X}_1\mathbb{X}_1}(\omega)$は

$$S_{\mathbb{X}_1\mathbb{X}_1}(\omega) \fallingdotseq \{ 1 + K\omega \,\mathrm{Img}\,[\mathbb{H}(j\omega)] + K^2\omega^2 |\mathbb{H}(j\omega)|^2 \} S_{\mathbb{X}_0\mathbb{X}_0}(\omega) \qquad (4)$$

ただし$K = \sqrt{8/\pi}\,\sigma_{\dot{x}_0}[\mathbb{C}_0]$、また$S_{\mathbb{X}_0\mathbb{X}_0}(\omega)$, $\mathbb{H}(j\omega)$はそれぞれ$\mathbb{X}_0$の応答スペクトル、周波数応答関数である。

計算に用いた波浪のスペクトルは卓越周期0.125Hz、最大波高0.23m、4.62mの二種類の実測スペクトル[3]である。Fig 1は波浪のスペクトルと構造物の応答の第一近似のスペクトル比($S_{\mathbb{X}_0\mathbb{X}_0}/S_{\mathbb{V}\mathbb{V}}$)を、構造物の一次の固有振動数で無次元化した振動数との関係で示したものであり、(1)式の質量力の影響を表わしている。図中、A, B, Cは計算に用いた構造形式を表わし、いずれも海底からの高さ105m、海底から平均海面までの高さ90mを有し、400tの重量をもつプラットフォームを直接支える4本の円柱は同じ波力をうけるように直径はいずれもΦ2.8m、水平部材、斜材の円柱の直径はΦ1.2mとした。しかし各々構造形式は異なっており、形式A、Cはいずれもラーメン構造であるが、Aに対しCは水平部材の数が多く、剛性が高いため、固有振動数はAの0.146Hzに対し、0.167Hzである。形式Bはトラス形式で、固有振動数は1.001Hzである。図中各曲線が波打っているのは、波の方向の支柱間隔と波浪の波長によって構造物全体として作用する外力が異なってくるためであり、最大の応答は曲線の上限の包絡線で与えられるものと考えられる。図から明らかなように、構造物の一次の

固有振動数に対して比較的高い振動数をもつ波浪では相対変位の第一次近似X_0は水粒子の速度V_0と殆んど一致し、構造物は変形しないものとして質量力を算定することができるが、構造物の一次の固有振動数よりも低い振動数をもつ波浪に対しては構造の変形を無視して質量力を算定することはできない。シーバース等通常の海中構造物では波浪の振動数に対して、構造物の一次の固有振動数は高く、したがって構造の変形を無視して質量力を算定することが不可能であることがわかる。

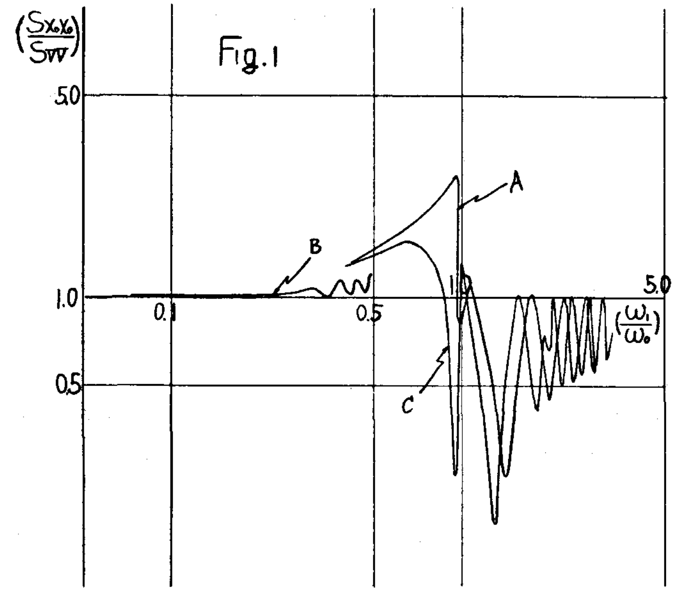
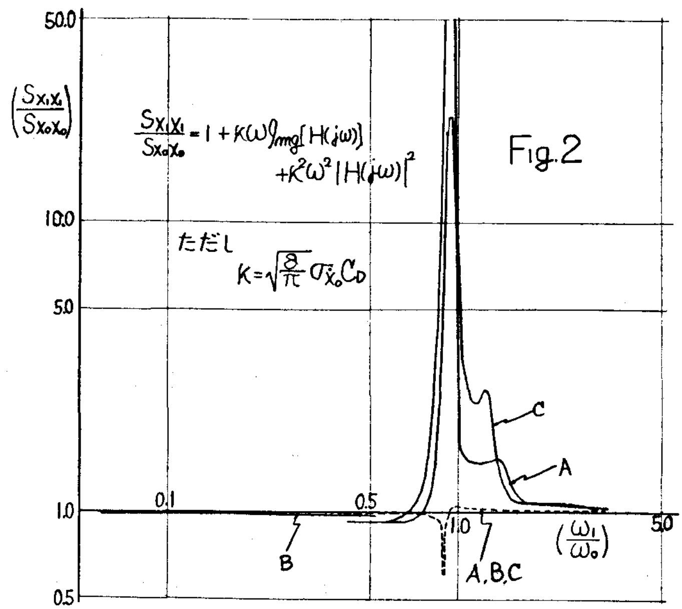


Fig 2 は第一次近似と第二次近似の応答スペクトル比（$S_{x_1x_1}/S_{x_0x_0}$）を表わしている。これは(4)式からも明らかなように、非線形項の影響、すなわち抗力と波高の関係、抗力と振動数比の関係を表わしている。実線は最大波高4.62m、点線は0.23mの場合である。波高が小さな場合には殆んど抗力の影響は無視できるが、波高が高い場合には波浪の振動数と構造物の固有振動数が一致する時に危険な状態となる。しかし構造物の一次の固有振動数が波浪の振動数に比べて高い場合には抗力の影響は殆んど認められず、むしろ安全側になることが明らかである。それ故、通常の海中構造物では、波浪の振動数よりも構造物の一次の固有振動数が高いから、抗力の影響は殆んど無視して差し支えないものと思われ、非線形項を含む(4)式を解くことなく、十分正しく波浪による外力を算定することができるものと思われる。



参考文献

① "Nondeterministic Analysis of Offshore Structures" Penzien 他, Proc. of A.S.C.E. E.M. Dec. 1970

② "不規則な波浪による海中構造物の応答と外力の算定" 奥村敏恵, 西岡 隆 第19回 橋梁工学研究発表会 (1972)

③ "The Directional Spectrum of A Wind Generated Sea as Determined for Date Obtained by the Stereo Wave Observation Project" Meteor. Paper. Vol 2. No. 6. New York. Univ. (1960)