

I-241 円柱型構造物が地震時に受ける流体力に関する基礎的考察

正会員 松本敏克 京都大学工学部 正会員 渡邊英一
 京都大学工学部 正会員 酒井哲郎 京都大学工学部 正会員 杉浦邦征

1. はじめに

構造計算において、流体と構造物の相互作用を考慮した上での流体力を算定するには、修正修正モリソン式が多用されている。これには一様な波動場での流体速度を用いざるを得ず、流体の乱れまでは考慮できない。したがって、波の波長に比して構造物の管径が大きいときや、地震時のように構造物がより高い振動数で動揺する場合には、適用できないとされている。そこで本研究では、柔軟な構造物に地震動が作用した場合にでも適用できる修正式を提案し、回折理論との比較・検討を行う。また、構造物が大型化する傾向にあり、その固有振動数が低下しつつあることを考慮して、比較的低周波の領域での外力特性とこの式の精度について考察する。

2. 等価モリソン式

流体の乱れを考慮するには、乱れの影響を数学的に表現できる回折理論を用いなければならない。波動場の特性をこの理論を用いて求め、その特性を正確に表すことができるように、モリソン式を次のように修正した。以下、この式を便宜的に等価モリソン式と呼ぶことにする。

$$dF = C_M \cdot \pi \rho r_0^2 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dz + C_D \cdot \rho r_0 \cdot \left(u - \frac{\partial x}{\partial t} \right) \left| u - \frac{\partial x}{\partial t} \right| dz - C_m \cdot \pi \rho r_0^2 \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} dz - C_r \cdot \omega \pi \rho r_0^2 \cdot \frac{\partial x}{\partial t} dz \quad (1)$$

ここに、 C_M ：慣性力係数、 C_D ：抗力係数、 C_m ：付加質量係数、 C_r ：減衰抵抗係数、
 ρ ：流体の密度、 r_0 ：円柱の半径、 u ：水粒子速度、 x ：円柱の水平変位、
 ω ：円柱の角振動数、ただし、 $\cdot$ は時間 t に関する微分を表す

第1項および第2項はそれぞれ慣性力と抗力であり、入射波に基づくものである。また、第3項と第4項は付加質量力と減衰抵抗力であり、構造物が運動することにより発生する。簡単のために、流体を完全流体とし、入射波を考えないことにすると、結局、第3項と第4項が残ることになる。また、波動場の特性が構造物の剛性によらず、構造物のサイズと外力の振動数により決定されることが明らかになったので、付加質量係数 C_m および減衰抵抗係数 C_r には角振動数 ω で定常に振動する剛体構造物に回折理論を適用して求められる次の値を用いた。ただし、 h は水深である。

$$C_m = \frac{\cosh k(h+z)}{n \cosh kh} R_{JY} + \sum_j \frac{\cos k_j(h+z)}{n_j \cos k_j h} R_j \quad C_r = \frac{\cosh k(h+z)}{n \cosh kh} I_{JY} \quad (2)$$

$$R_{JY}(kr_0) = -\frac{J_1(kr_0 J_0 - J_1) + Y_1(kr_0 Y_0 - Y_1)}{(kr_0 J_0 - J_1)^2 + (kr_0 Y_0 - Y_1)^2}$$

$$I_{JY}(kr_0) = \frac{2}{\pi} \frac{1}{(kr_0 J_0 - J_1)^2 + (kr_0 Y_0 - Y_1)^2}$$

$$\frac{K_1(k_j r_0)}{K_1'(k_j r_0)} = -k_j r_0 \frac{K_1}{k_j r_0 K_0 + K_1} = -k_j r_0 R(k_j r_0) \quad (3) \quad (\text{図-1 参照})$$

ここで、 J_n は n 次の第一種ベッセル関数、 Y_n は n 次の第2種ベッセル関数、 K_n は n 次の第2種変形ベッセル関数である。また、 k および k_j には次の関係がある。ただし、 g は重力加速度である。

$$k \tanh kh = \frac{\omega^2}{g} \quad k_j \tan k_j h = -\frac{\omega^2}{g} \quad (4)$$

3. 解析モデル

本研究では円柱を円筒薄肉断面を有する片持ち梁とし、これに梁理論に基づいた有限要素法を適用して解析を行った。このとき3次の形状関数を仮定している。質量マトリックスには、整合質量マトリックスを用い、減衰マトリックスは、構造物のみの質量に減衰を比例させた。このとき、1次の減衰定数 h を0.02としている。

4. 数値解析結果および考察

波動場の特性を表す付加質量と減衰抵抗に関する検討を加えるために、構造物と流体からなる一体の系を考えたときの振動特性と関連づけて考察を行う。この系とは、水の付加質量を構造物の質量の一部とみなすことにより成り立つ。

(1) 系の固有振動数の特性

図-2は、様々な振動数の外力が作用したときの、構造物と流体からなる系の1～3次の固有振動数の変化を示している。従来のように、 $C_H=2.0$ としたモリソン式による結果は外力の振動数によらず一定であるのに対し、回折理論によるものは一定ではない。これは流体の乱れによる影響と考えられる。また、等価式では回折理論と同じく系の固有振動数が変化する。

(2) 系の振動モード形の比較

等価式も回折理論と同じく、外力の振動数の変化に応じてモード形状が変化する。1次モード、2次モードはともに回折法と同じモード形状を示し、3次モードは付加質量分布が安定する高周波側では回折法に一致していることが明らかになった。

(3) 系の動的応答倍率 M_{max} の変化

図-3では、減衰抵抗のない場合の M_{max} でも、減衰定数 h が一定であるにもかかわらず kr_0 に応じて M_{max} が変化している。これは減衰項の中で水の粘性を無視したことにより、系の見かけの減衰定数が付加質量の影響を受けて変化したことによる。一方、減衰抵抗のある場合の M_{max} は大きく低下しており、 $kr_0=1.0$ のときに最小となる。減衰抵抗が最大になる場合と対応している。また、回折理論と等価式の低下の様子は同程度である。

5. まとめ

系の振動特性の変化を、新たに修正を加えた等価モリソン式により、回折理論と同様にとらえることができる。その精度は実用に十分なものであり、構造計算における波力式の簡略化、さまざまな構造に対する汎用性という観点から、この式は非常に有用である。

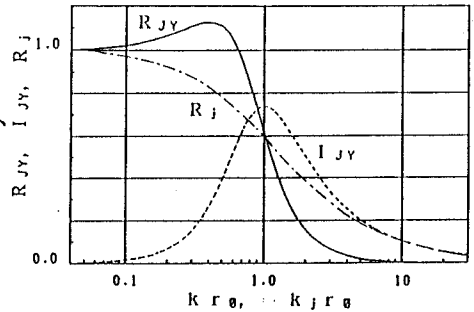


図-1 R_{JY} , I_{JY} , R_J の値

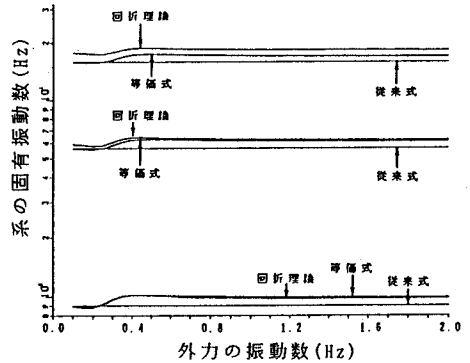


図-2 系の固有振動数

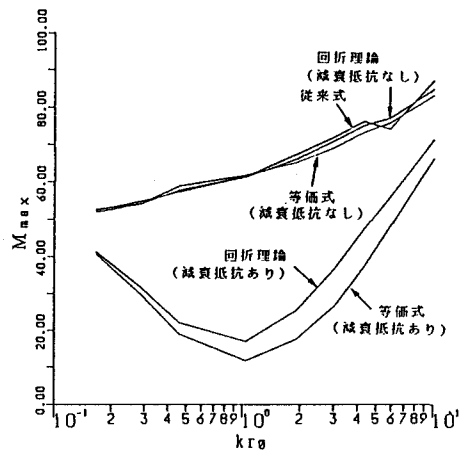


図-3 動的応答倍率 M_{max}