

高次振動時の水中弾性円柱 の付加質量係数について

ADDED MASS COEFFICIENT OF SUBMERGED ELASTIC CYLINDRICAL COLUMNS AT HIGH FREQUENCIES

渡邊英一* 松本敏克** 酒井哲郎*** 杉浦邦征****

By Eiichi WATANABE, Toshikatsu MATSUMOTO, Tetsuo SAKAI and Kunitomo SUGIURA

For the design of flexible offshore structures, the wave forces are usually evaluated based on the Morison equation. Although it is simple to use, there exists several restrictions to its application. Thus, a correction is made herein to the added mass coefficient of the equation following the diffraction theory so that the Morison equation can also be used in the case of earthquake excitations taking into account the scattering of waves caused by the interaction between the fluid and the structure. The offshore structure considered herein is an elastic cylindrical column and is analyzed by the finite element method, and it was found that the fundamental characteristics of the diffraction of the waves do not significantly depend on the rigidity of the structure but on the size and the circular frequency of the external excitations. From this, a correction is proposed to be made to the added mass coefficient that is found to vary along the depth of the cylinder using in its place that of the rigid cylinder oscillating horizontally.

1 はじめに

構造計算において、円柱型構造物に作用する流体力を算定する場合には、修正モリソン式が多用される。これは非常に簡易的な式であるにもかかわらず、精度よく流体の影響をとらえているからである。また鉛直部材のみならず、斜め部材などへの適用に関する研究もされており¹⁾、現実的な構造物に対しても適用できるところが有用である。円柱の単位鉛直長さあたりに作用する流体力 F は以下のように表せる。

$$F = C_M \rho \pi r_0^2 \ddot{u} + C_D \rho r_0 (u - \dot{x}) |\dot{u} - \dot{x}| - (C_M - 1) \rho \pi r_0^2 \ddot{x} \quad (1)$$

ここで、 C_M ：慣性力係数、 C_D ：抗力係数、 r_0 ：円管の半径、 u ：水粒子速度、 x ：円管の水平変位、 ρ ：水の密度、
ただし、「 $\cdot$ 」は時間に関する微分を表すものとする。

* Ph. D. & 工博	京都大学教授	工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
**	工修	株式会社新日本技術コンサルタント	(〒542 大阪市中央区島之内1丁目20-19)
***	工博	京都大学助教授	工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)
****	Ph. D.	京都大学助手	工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

ところが、この有用なモリソン式にも、いくつかの制約がある。それは、式の適用にあたり、一様な波動場での水粒子速度を仮定し、水の流れが構造物により乱れる影響をまったく無視していることである。したがって、波の波長に比して構造物の管径が大きい場合や、地震時のように構造物が高次振動する場合には、この式の適用性には疑問があると考えられている。

一方、完全流体を仮定しているものの、速度ポテンシャルを用いた回折理論による方法は、流体が構造物の表面で反射することにより生ずる散乱波を数学的に記述することができる。したがって、構造物により引き起こされる流体の乱れを厳密に考慮することが可能であり、動水圧実験との比較もされ、その妥当性が示されている^{2), 3)}。ただし、波方式は非常に複雑であり、実用的とは言い難い。

水理学的な適用性の観点から、波浪を受ける柔軟な構造物に対してはモリソン式が適用され^{4), 5)}、また、地震動を受ける剛な構造物に対しては回折理論が適用される場合が多い^{6), 7)}が、回折理論を地震動を受ける柔軟な構造物に適用した研究は数少なく、1自由度系を用いた解析例⁸⁾や、水中での振動モードを地上のモード形で近似した解析例^{9), 10)}を挙げることができる程度である。

そこで、本研究の目的は、回折理論を用いてモリソン式との比較・検討を行い、柔軟な構造物に地震動が作用した場合にでも、このモリソン式の適用ができるように、付加質量係数の修正を試みるものである。

2 回折理論を用いた波力^{8), 11)}

流体の乱れを考慮するには、完全流体を仮定しなければならないものの、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ことは述べた。円柱に作用する波力のうち、完全流体としての理論的計算から導き得るのは、モリソン式という慣性力に対応する成分のみである。本研究ではしたがって、抗力成分は対象とせず、議論を慣性力に対応する成分に限ることにする。

構造物が角振動数 ω により定常的に揺れていて、変位 $x(t)$ を生じている場合を考え、この波動場の状態は微小振幅波の理論に従い、振幅を a と仮定する。Fig. 1 は座標系を示すが、基礎方程式は流体の連続式であり、水面、水底、無限遠、そして構造物の表面における境界条件により波動場の速度ポテンシャル Φ が求まる。単位面積あたりに作用する波圧 p はこの速度ポテンシャル Φ を用いてつぎのように求めることができるし、単位長さ当りの波力 P はこの p を以下のように円周方向に積分することにより求められる。

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2)$$

$$P = - \int_0^{2\pi} p \cos \theta \cdot r_0 d\theta = P_{in} + P_{sc} \quad (3a)$$

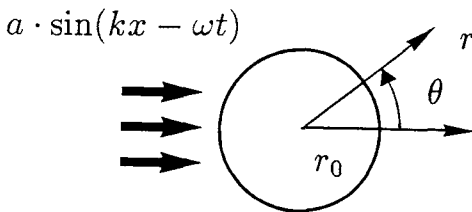


Fig. 1 (a). 円柱回りの波浪場と座標系

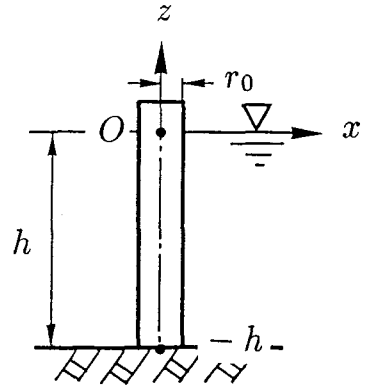


Fig. 1 (b). 円柱の深さ方向の座標

$$P_{in} = -2\pi \rho g r_o a \left[\{J_1(kr_o) - J_1'(kr_o) \frac{H_1^{(2)}(kr_o)}{H_1^{(2)'}(kr_o)}\} \frac{\cosh(h+z)}{\cosh(kh)} \right] \quad (3b)$$

$$P_{sc} = \pi \rho r_o^2 \omega^2 \left[\sum_j \frac{k_j \cos k_j(h+z)}{n_j \sin k_j h \cos k_j h} R_j \int_{-h}^0 x(z) \cos k_j(h+z) dz \right. \\ \left. + \frac{k \cosh k(h+z)}{n \sinh k h \cosh k h} (R_{Jv} - i I_{Jv}) \int_{-h}^0 x(z) \cosh k(h+z) dz \right] \quad (3c)$$

ここに、

$$R_{Jv}(kr_o) = - \frac{J_1(kr_o J_o - J_1) + N_1(kr_o Y_o - N_1)}{(kr_o J_o - J_1)^2 + (kr_o N_o - N_1)^2}, \quad I_{Jv}(kr_o) = \frac{2}{\pi [(kr_o J_o - J_1)^2 + (kr_o N_o - N_1)^2]} \quad (3d)$$

$$R_j(k_j r_o) = \frac{K_1}{k_j r_o K_o + K_1}$$

ただし、

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right], \quad n_j = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2k_j h}{\sin(2k_j h)} \right] \quad (3e)$$

さらに、 k および k_j はそれぞれ入射波と散乱波の波数であり、次の超越方程式を満たす。

$$k \tanh(kh) = \frac{\omega^2}{g} \quad (4a)$$

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

このうち P_{in} は入射波に基づくものであり、狭義の慣性力という。また、 P_{sc} は流体が、構造物の表面で反射することにより生ずる散乱波に基づく力である。また、 J_n 、 J_n' 、 N_n 、 K_n 、および $H_n^{(2)}$ 、 $H_n^{(2)'}$ はそれぞれ、 n 次の第1種ベッセル関数、同関数の一次導関数、ノイマンのベッセル、第2種変形ベッセル関数、および第2種ハンケル関数、同関数の一次導関数を表す。

3 剛体構造物を用いた波力の解析

3.1 解析モデル

これまでは入射波と散乱波が同時に存在する流体場での波力を考えたが、ここからは簡単のために入射波が存在しない流体場での波力を考えよう。波力式(3c)には、被積分関数として構造物の変位曲線が含まれており、解析をする上で大きな問題となる。ところが、構造物が剛体の場合 ($x(z) = \zeta = \text{一定}$ 、すなわち、角振動数が ω の単純水平並進運動をする場合) には、この積分は容易に計算できて、波力 P は次のように求められる。

$$P = (\pi \rho r_o)^2 [\omega^2 C_n - i \omega (\omega C_r)] \zeta \exp(i \omega t) \quad (5a)$$

$$C_n = C_{n1} + C_{n2} \quad (5b)$$

$$C_r = \frac{k \cosh k(h+z)}{n \cosh kh} I_{JY} \quad (5c)$$

$$C_{m1} = \sum_j \frac{\cos k_j(h+z)}{n_j \cos k_j h} R_j \quad (5d)$$

$$C_{m2} = \frac{k \cosh k(h+z)}{n \cosh kh} R_{JY} \quad (5e)$$

式(5a)の第1項は構造物の加速度に比例していると考えられるので、これを付加質量力という。また第2項は加速度に対して90度の位相差をもつことから、構造物の速度に比例すると考えられるので、これを減衰抵抗力と呼ぶことにする。また、 C_m を付加質量係数と呼ぶことにする。これに対し、モリソン式においては、付加質量力に対応する係数を C_{m1} により表している。さらに、 C_r を減衰抵抗係数と定義する。

3. 2 波力の成分項の検討

Fig. 2 (a)には、式(4)に含まれる成分項 $C_m = C_{m1} + C_{m2}$ と C_r の鉛直分布を示す。ただしこれは、水深 $h = 50.0\text{m}$ 、管の半径 $r_g = 2.50\text{m}$ 、外力の振動数 $f = \omega/2\pi = 0.2\text{Hz}$ のときのものである。また、Fig. 2 (b)と Fig. 2 (c)は同様に水深 $h = 50\text{m}$ のとき、それぞれ、 $f = 0.1\text{Hz}$ と $f = 2.0\text{Hz}$ のときの付加質量係数 C_m の値が深さ z 方向にどのように分布するかを管径 r_g のいろんな値に対してプロットしたものである。 $f = 2\text{Hz}$ のような高次振動数の場合、 C_m の値の変動が大きいことに注目したい。ところで、 C_{m2} および C_r は、水面の上下変動の影響により引き起こされるものである。まずこの2つの項について検討する。 $\cosh k(h+z)/\cosh kh$ の項は鉛直方向の分布形状を表し、無次元パラメータ kh が大きい場合には水底付近で0、水面付近で1になり、単調に増加する。ここで、 h は水深、 k は波数を表す。この k は超越方程式(4a)の解であるので、 h と f (または角振動数 ω) の関数であり、また、無次元パラメータ n もまた、 kh の関数である。 kh が非常に小さいときは $n = 1$ となるが、 kh が4をこえると n は0.5になる。 R_{JY} と I_{JY} は無次元パラメータ kr_g の関数であり、Fig. 3のように変化する。

つぎに付加質量係数のうちの級数項の C_{m1} について検討する。 C_{m1} の概形は Fig. 2 に示すとおりであり、水底では1、水面では負になる。この項に含まれる R_j は、Fig. 4のような変化をする。この級数が収束することは確かめられている³⁾。

このように、波力の特性は、無次元パラメータ kh 、 kr_g 等により支配されると考えられる。

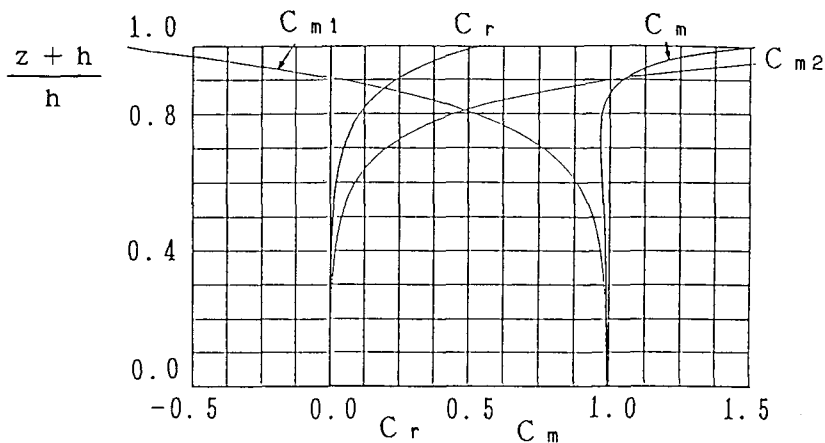
4 弾性体構造物を用いた振動解析

4. 1 解析手法

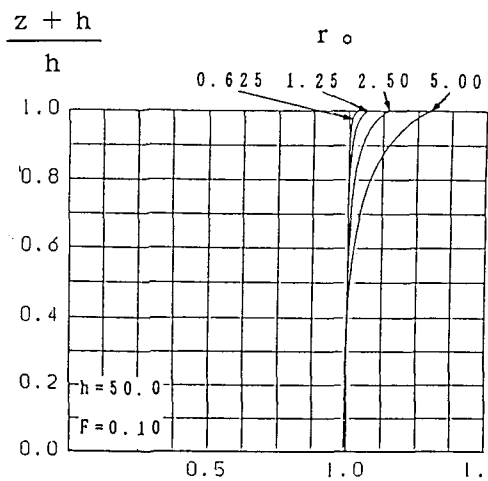
いま、構造物の単位長さ当りの質量を M 、同減衰係数を C 、同剛性係数を K 、構造物の変位を x とすれば、流体中の構造物の運動方程式は式(3a)により以下のように表すことができる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P = P_{in} + P_{so} \quad (6)$$

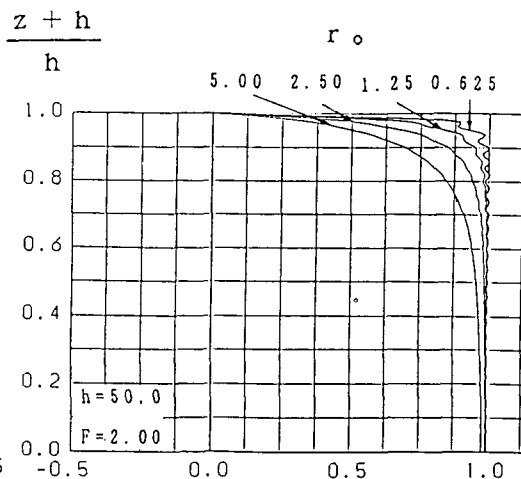
構造物の変位曲線 $x(z)$ は被積分関数として波力式(3c)の中に含まれていて、解析上困難であるが、離散化手法を用いれば変位関数を考えることにより、節点変位を要素内での積分項から取り出すことができる。本論文ではもっと簡便な手法として式(3c)中の $x(z)$ を要素内では一定と考え、近似的に積分の外に出す方法を用いることにした。この場合は、付加質量効果、すなわち、相互作用の影響を考慮できる。したがって、流体と構造物の一体の系の固有振動数、モード形、応答倍率を容易に求めることができる。ただし、近似の精度を高めるために離散間隔を小さくとる必要があることに留意する必要がある。



(a) C_m 、 C_{m1} 、 C_{m2} 、および C_r の値 ($f = 0.2 \text{ Hz}$)



(b) $f = 0.1 \text{ Hz}$ のときの C_m



(c) $f = 2.0 \text{ Hz}$ のときの C_m

Fig. 2. 付加質量係数 C_m と減衰抵抗係数 C_r ($h = 50 \text{ m}$)

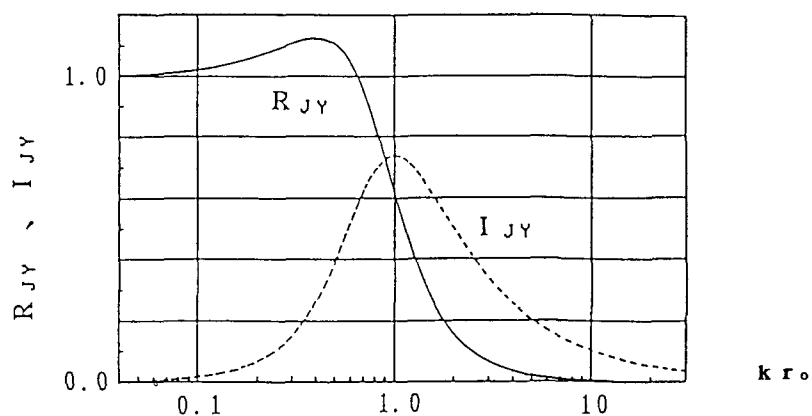


Fig. 3. R_{JY} と I_{JY} の値

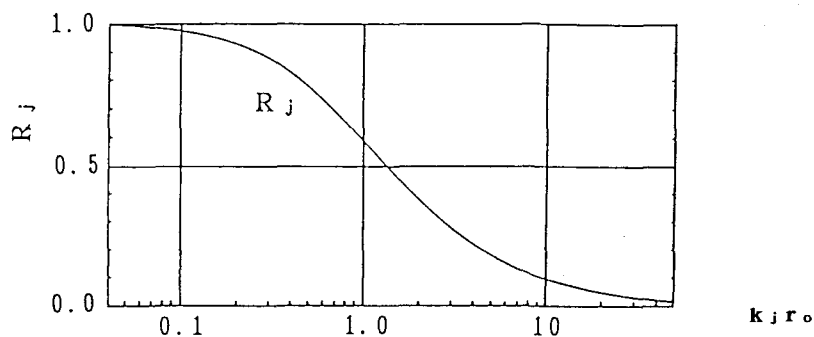


Fig. 4. R_J の値

4. 2 解析モデル

Fig. 5 に示されたような下端固定の片持ち支持の円柱モデルを考える。海底地盤の水平変位 $x(z=-h)$ を想定し、また、断面は円筒薄肉形状と仮定した。数値解析は、はり理論に基づき、3 次の変位関数を用いた有限要素法を適用し解析を行った。質量マトリックスには、整合質量マトリックスを用いた^{12), 13)}。構造物の構造減衰に関しては、粘性減衰の効果を質量比例により表すことが通常行われるが、流体を非粘性として取り扱っているため、構造物のみの質量に減衰を比例させた減衰マトリックスを用いた。このときの比例定数は、1 次の減衰定数 h を 0.02 として、次のように求めた¹²⁾。

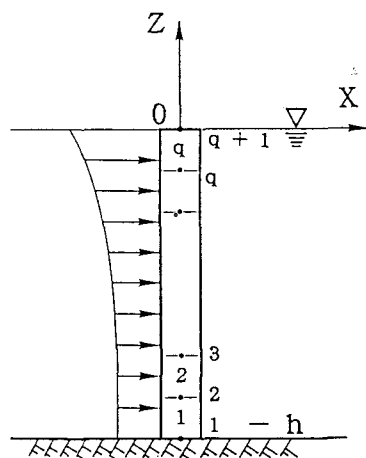


Fig. 5. 下端固定の片持ち円柱の有限要素モデル

$$\alpha_1 = 2 h \omega_1 \quad (7)$$

ただし、この1次の固有振動数 ω_1 は、地上にある同じサイズの構造物の値を用いている（弾性定数 $E=2.1 \times 10^7 \text{ tonf/m}^2$ 、板厚 $t=4 \text{ cm}$ ）。また、分割数 q が固有振動数 f 、ならびに柱頭の水平変位 $x(z=0)$ の動的応答倍率 $M_{\max}$ に及ぼす影響は最終ページの付表に示したとおりであり、計算精度の判断により、以下の計算は $q=10$ を用いて行った。なお、固有値の計算法としては Bathe のガウス・スタビライゼーション法を用いた（最大反レベション数は400）。なお、長さ h のはりの空中での1次曲げ角振動数 ω_1 は $(0.597 \pi / h)^2 \sqrt{gEI/w}$ （ w ：はりの単位長さ重量）である。

4. 3 モード解析を利用した考察手法

モード解析法を用いて系の振動特性を決定する。ここでは系の固有振動数、固有振動モード形、柱頭の水平変位 $x(z=0)$ の動的応答倍率の3つを求めるが、モードの直交性を利用して運動方程式を非連成化する。

4. 4 系の固有振動数の特性

Fig. 6は、長さ50m、半径2.5mの円柱に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（すなわち、構造物の質量に水の付加質量を含めた場合の見かけの固有振動数、以後これを系の固有振動数と呼ぶことにする）の変化を示している。この図の横軸は、外力の振動数であり、縦軸は系の固有振動数である。従来のように、 $C_H=2.0$ とした修正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モリソン式のそれよりも多少大きく、また一定ではない。流体の乱れは構造物の動揺により引き起こされることから、これは構造物の振動数（すなわち外力の振動数）に依存する。したがって、この系の固有振動数の変化こそが流体の乱れの影響と考えられる。

そしてこの1次の固有振動数の差は最大で約15%、2次で約10%、3次で約18%程度に及ぶ。周波数伝達関数は振動数比（外力の振動数 ω と固有振動数 ω_0 の比 ω/ω_0 ）と減衰定数により定まるので、この固有振動数の差異は応答にもかなりの差異を及ぼすものと考えられる。

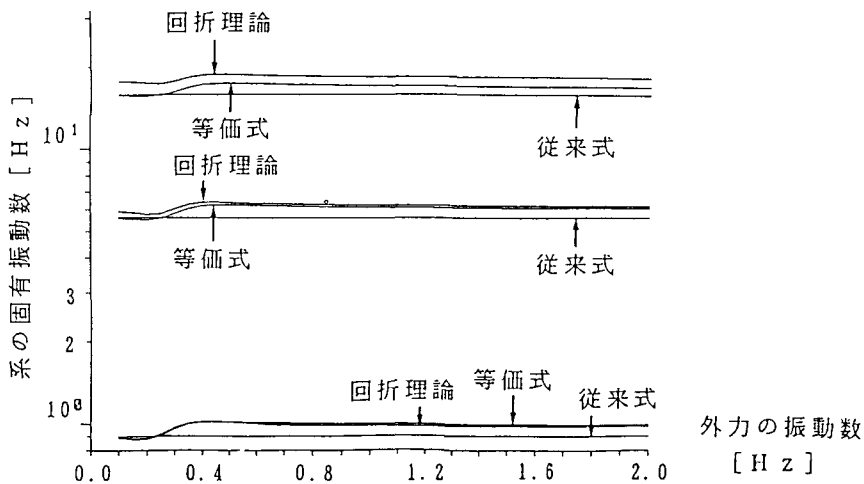


Fig. 6. 円柱と流体からなる系の固有振動数 [$h=50\text{m}$ 、 $r_0=2.5\text{m}$ の場合]

4. 5 系の固有振動数と付加質量係数の関係

(1) 柱頭での付加質量係数と系の固有振動数の関係

Fig. 6 によれば、1～3 次の固有振動数はともに外力の振動数 f が $0.20 \sim 0.25$ (Hz) で最小値、また $0.40 \sim 0.45$ (Hz) あたりで最大になり、その後わずかに低下してほぼ一定値になっている。 $f = 0.20 \sim 0.25$ (Hz) は無次元パラメータ kr_0 の $0.40 \sim 0.62$ に対応している。これは Fig. 7 によると C_{m1} と C_{m2} の和 ($= C_m$) の最大値に対応している(このとき、 R_{JV} も最大値になっている。) この図は柱頭における付加質量係数 C_m を表しており、縦軸の正の領域には表面変動項 C_{m2} 、負の領域には級数項 C_{m1} を描いてある。ただし、横軸は無次元パラメータ kr_0 である。柱頭においては、 C_{m1} の変化よりも、 C_{m2} の変化が卓越していることがこの図より明らかである。一方、 $f = 0.40 \sim 0.45$ (Hz) は kr_0 の $1.61 \sim 2.03$ に対応している。この領域では、 C_m はかなり小さくなっており、0 または負の値を示す。(R_{JV} も $0.1 \sim 0.3$ 程度である。) すなわち、 $f = 0.20 \sim 0.25$ (Hz) では付加質量係数が大きく、 $f = 0.40 \sim 0.45$ (Hz) から高周波側では付加質量係数が小さいことを示している。

(2) 柱底での付加質量係数と系の固有振動数の関係

無次元パラメータ kh による柱底における級数項 C_{m1} と水面変動項 C_{m2} の和の変化の様子を Fig. 8 に示す。これによると、 $kh \leq 6.0$ の領域では C_{m2} は激しく変化しているにもかかわらず、この領域において C_{m1} と C_{m2} の和は一定であり 1 である。またこの周波数領域では、柱頭における付加質量係数 C_m は、周波数領域 ($0.2 \text{ Hz} \leq f \leq 0.4 \text{ Hz}$) での柱頭のそれほど急激な変化をしていない。さらに、この周波数領域での付加質量係数の鉛直分布も水面近くまではほとんど 1 であることがわかった。したがって、剛体において級数項 C_{m1} の分布を支配する無次元パラメータ kh もまた、弾性体の場合での支配パラメータに十分なり得ると考えられる。

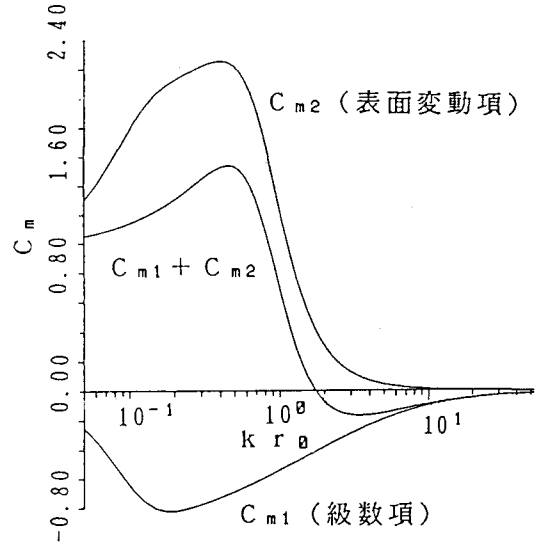


Fig. 7. 柱頭における付加質量係数 C_m 、 C_{m1} 、 C_{m2} の値 [$h=50\text{m}$ 、 $r_0=2.5\text{m}$ の場合]

このように、系の固有振動数の変化特性は、付加質量係数の鉛直分布の変化の様子とよく一致しており、剛体での支配パラメータ、すなわち、 kr_0 および kh が弾性体においても支配パラメータとして同様に重要であることが認められよう。言い替えれば、柔軟な薄肉断面の構造物を用いたにもかかわらず、付加質量係数の分布特性が剛体の場合とそれほど変わらないということは、波動場の特性は構造物の剛度にはそれほど影響を受けず、むしろ構造物のサイズに大きく支配されるということを意味することが判る。

5 モリソン式の修正

5.1 モリソン式の修正法

回折理論による波力式と従来のモリソン式の違いについて考える。まず、モリソン式である深度の波力を求めるには、その深度における構造物の変位が決められればよい。ところが、回折理論では、ある深度の波力を求めるにも、すべての深度における変位を求めなければならない。また、モリソン式では、構造物の速度に比例するような波力成分（減衰抵抗）は存在しない。以上のことを念頭においてモリソン式を次に表すように修正する。z方向に微小部分dzを考え、この部分に作用する流体力をdFとすれば式(1)を参考にし、以下のように書ける

$$dF = C_M \cdot \pi \rho r_0^2 \frac{\partial u}{\partial t} dz + C_D \cdot \rho r_0 \left(u - \frac{\partial x}{\partial t} \right) \left| u - \frac{\partial x}{\partial t} \right| dz - C_m \cdot \pi \rho r_0^2 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} dz - C_r \cdot \omega \pi \rho r_0^2 \frac{\partial x}{\partial t} dz \quad (8)$$

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。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。4で考察したように、波動場の特性は、構造物のサイズと外力の振動数により決定されることから、剛体構造物で求めた付加質量係数 $C_m(5b)$ および減衰抵抗係数 $C_r(5c)$ をそのまま用いることで波動場の特性を表すことができる。以下、この修正したモリソン式を便宜的に等価モリソン式と呼ぶことにする。解析モデルは4で述べたものを用いるものとする。

5.2 系の固有振動数の比較

前掲のFig. 6は、 $h=50.0\text{m}$ 、 $r_0=2.50\text{m}$ の場合の構造物と流体からなる系の固有振動数である。回折理論、従来式および等価式による1～3次の固有振動数曲線が計9本描かれている。従来式では、外力の振動数 f によらず系の固有振動数が一定であるのに対し、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。しかも、1～3次のいずれの場合においても、系の固有振動数の最小値および最大値に対応する f の値はほぼ一致している。1, 2次では、その値の大きさも、回折理論のそれとはほぼ一致しているが、3次になると一致の程度は多少悪くなるが（とくに、 $f=0.40\text{Hz}$ 以下の付加質量係数が著しく変化する領域においては一致していない）、それでも、従来式よりは回折理論にはるかに近い。したがって、等価式は、固有振動数でみる系の振動特性をよくとらえていると考えてもよい。

5.3 振動モード形の比較

Fig. 9は、Fig. 6に対応する構造物の1～3次の振動のモード形を4つの異なる周波数、 $f=0.1\text{Hz}$ 、 0.2Hz 、 0.4Hz 、そして 2.0Hz について示してある。従来式では、どの場合においてもモード形状に変化はみられない。これは付加質量分布が外力の振動数 f に対して不変であることによる。一方、回折理論によれば、 f に応じて付加質量分布が変化する。その結果、振動のモード形も変化するようになる。ただし、1次モー

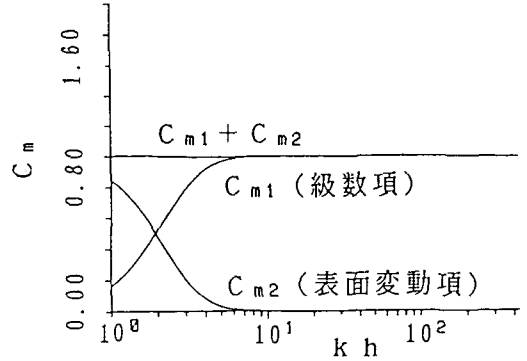


Fig. 8. 柱底での付加質量係数 C_m 、 C_{m1} 、 C_{m2} の値 [$h=50\text{m}$ 、 $r_0=2.5\text{m}$ の場合]

ドはその影響を全く受けず、従来式のモード形と完全に一致している。2次モードもその影響をほとんど受けないことが分かる。ところが、3次モードにいたっては、その形状は f に応じて敏感に変化している。 $f = 0.40\text{Hz}$ 以上の高周波側では系の固有振動数ならびにモード形にはほとんど変化が無い。このことは取りも直さず、付加質量係数分布に大きな変化が現れてはいないことを物語っている。

等価式も回折理論と同じく、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す。3次モードは付加質量係数分布が安定する $f = 0.40\text{Hz}$ 高周波側では回折法に一致している。

2次ないし3次のモードがあらわれるのは、かなりの高周波側であり、地震動が作用する場合などに対応する。このときには付加質量係数分布はすでに安定しており、等価式のモード形は回折理論に一致し、系の固有振動数もかなりそれに近くなっている。また、通常の波浪のみが作用する低周波の領域においては、1次モードが卓越しており、このモード形状は低周波の領域においても回折理論に一致しているので、波浪に対して等価モリソン式を回折理論の代わりに用いることは実用上全く問題はない。これに反し、耐震設計において応力を求めるようなときには、2～3次の比較的高次のモードが与える影響が大きいことから、このような場合に等価式を用いると非常に便利である。

5. 4 減衰抵抗の影響

Fig. 10 は、構造減衰定数 $h=0.02$ のとき、柱頭の水平変位 $x(z=0)$ の1次の動的応答倍率 $M_{\max}$ を減衰抵抗 C_r を考慮した場合について示したものである。縦軸には $M_{\max}$ を横軸には無次元パラメータ kr_0 とっている。横軸に kr_0 をとった理由は、減衰抵抗は I_{Jy} に依るところが大きく、この変化を表す適切な無次元パラメータは kr_0 であるからである。

減衰抵抗係数 C_r を考えない場合の動的応答倍率 $M_{\max}$ は、回折理論および等価式により求められたものとともに従来式によるものと一致している。構造減衰定数 h が小さいときには、

$$M_{\max} = 1 / 2 h \quad (9)$$

なる関係があるので、この場合のように構造減衰定数 h が一定のときには、 $M_{\max}$ も一定である。ところが、Fig. 10によれば kr_0 が増加するとともに従来式の $M_{\max}$ でさえも増加している。これは、 $M_{\max}$ が構造物と流体からなる系の動的応答倍率であるので、系の見かけの減衰定数が付加質量の影響を受けて変化することによるためである。

一方、減衰抵抗係数 C_r を考慮した場合の $M_{\max}$ は減衰抵抗のない場合に比べて大きく低下している。最も低下しているのは $kr_0=1.0$ のときで、減衰抵抗係数の最大値と対応しており、回折理論と等価式の低下の様子は同程度である。

6 結論

最後にこの研究を通じて明らかになった重要な事柄をまとめておく

(1) 系の振動特性は外力の振動数によって変化するが、これは流体の乱れの影響であると考えられる。この変化は地震動の卓越振動数に比べ比較的低周波の領域で大きく現れる。

(2) 流体と構造物の相互作用を考えたとき、運動により引き起こされる力を特徴づけるのは付加質量分布や減衰抵抗分布であるが、これらの特性は構造物の剛度にあまり影響を受けない。すなわち、散乱波の波

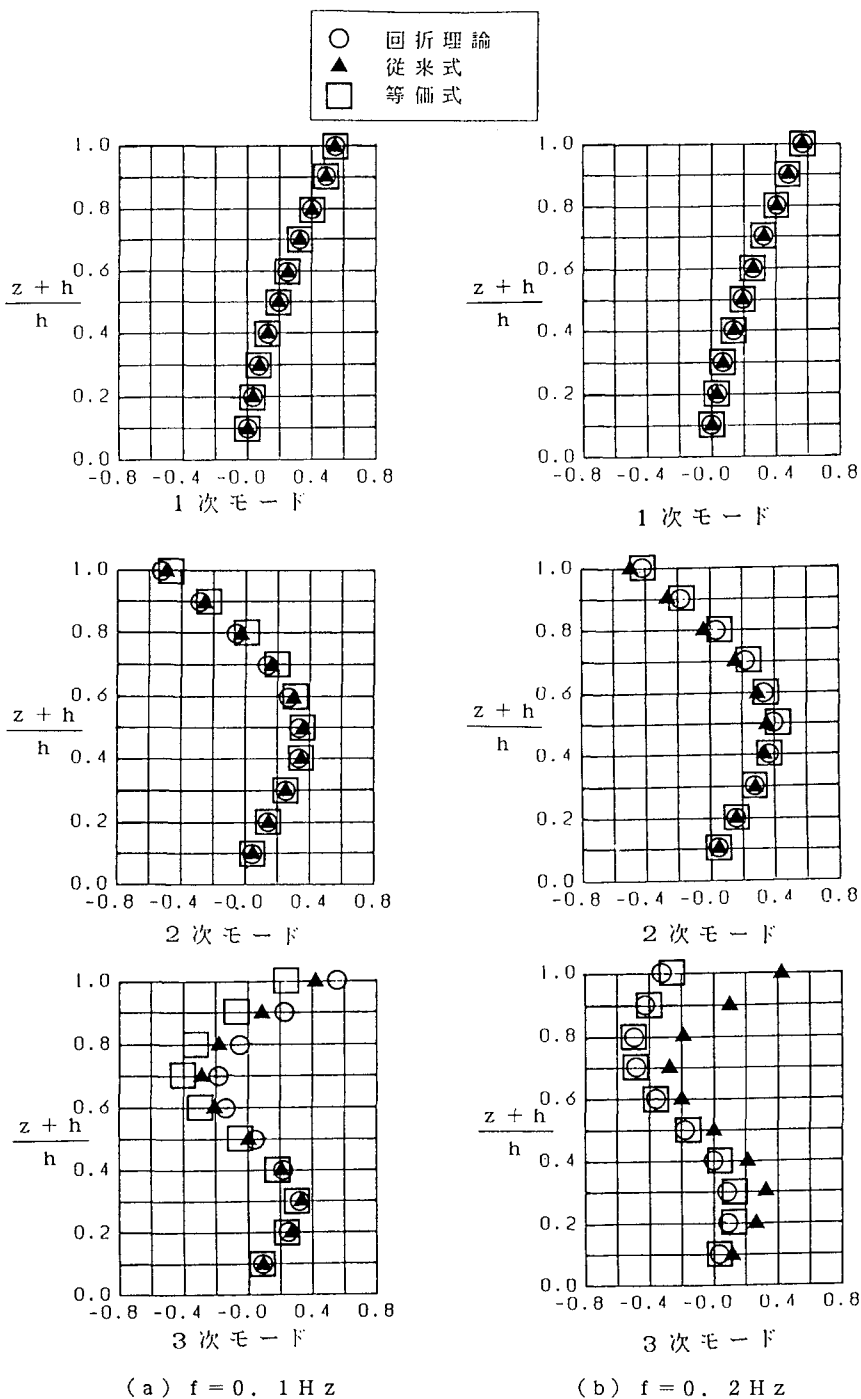


Fig. 9. 等価モリソン式と回折理論による振動モードの比較 [$h=50\text{m}$ 、 $r_0=2.5\text{m}$ の場合]

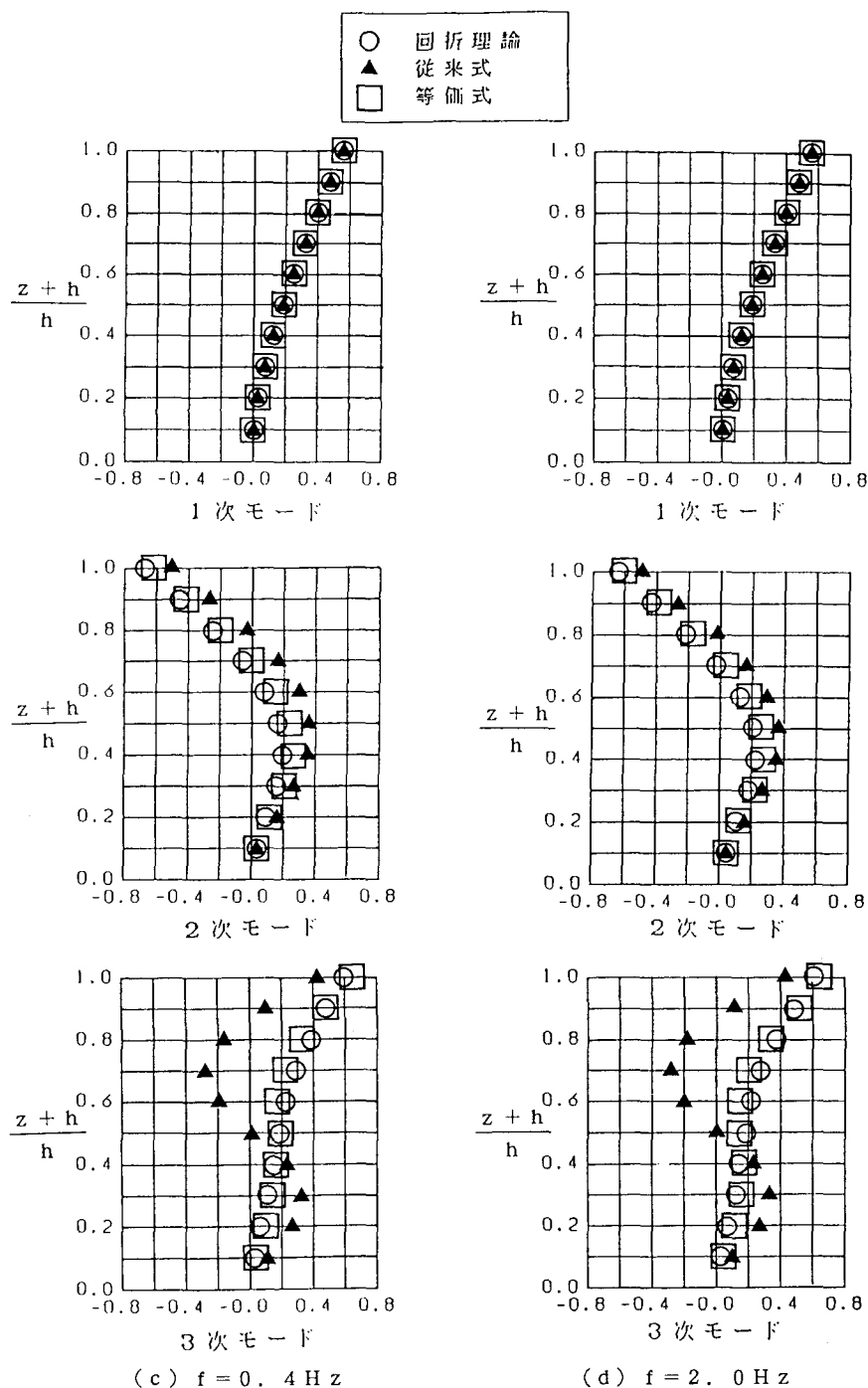


Fig. 9. 等価モリソン式と回折理論による振動モードの比較 [$h=50\text{m}$ 、 $r_0=2.5\text{m}$ の場合]

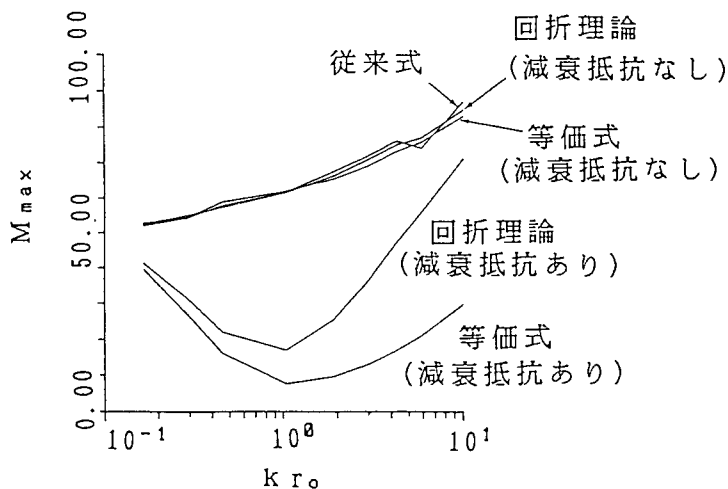


Fig. 10. 減衰抵抗の動的応答倍率に与える効果

動場の特性は構造物のサイズと外力の振動数により決定される。そしてこれらを支配する無次元パラメータは、 kr_0 と kh である。

(3) 波浪に代表される低周波の領域と、地震動に代表される高周波の領域の間には、減衰抵抗が非常に大きくなる領域がある。これによる減衰の効果は大きく、とくに $kr_0 = 1.0$ のときに最大の効果を示す。合理的な耐震設計を目指すにはこの効果を把握する必要がある。

(4) 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。

参考文献

- 1) 荻原国宏:土木学会編 新体系土木工学25 流体力, 技報堂出版, pp56-63, 1986.
- 2) 小林 浩・田中正博・蔵田忠広:海洋構造物に作用する地震時動水圧, 第24回海岸工学講演会論文集, pp404-408, 1977.
- 3) 清川哲志・田中正博・小林 浩:全没水大型円筒構造物の地震時付加質量, 第29回海岸工学講演会論文集, pp457-461, 1982.
- 4) 花村哲也・田中良弘・大阪一:柱状構造物の波浪応答解析と現地観測, 第23回海岸工学講演会論文集, pp74-79, 1976.
- 5) 石田 啓:微小振動波による小口径柱体の振動に関する理論解, 土木学会論文集第369号, pp243-251, 1986

1986.

- 6) 桜井彰雄:水中に立てられた柱状構造物の振動, 土木技術, 16巻 6号, pp11-17, 1961.
- 7) 清川哲志・小林 浩:大型軸対称海洋構造物の地震時付加質量, 第29回海岸工学講演会論文集, pp452-456, 1982.
- 8) 伊藤喜行・木原力:円柱の動揺に伴う造波抵抗, 港湾技術研究所報告, 第11巻第3号, pp37-58, 1972.
- 9) 小坪・高西:多柱基礎橋脚に対する水の付加質量の3次元解析, 土木学会論文報告集, No. 248, pp. 1-10, 1976.
- 10) Venkatarama, K., Yosihara, S.:Hydrodynamic Coefficientic for Flexible Offshore Columns by Wave Diffraction Techniques, Applied Ocean Research, Vol. 2, No.1, pp51-56, 1989.
- 11) 岩佐義朗:水理学, 朝倉書店, pp182-189, 1967.
- 12) 土岐憲三:土木学会編 新体系土木工学11 構造物の耐震解析, 技報堂出版, pp132-133, 1981.
- 13) Desai, C.S. and Abel, J.F.:Introduction to the Finite Element Method, A Numerical Method for Engineering Analysis, Van Nostland Reinhold, 1972.

付表 分割数 q による固有振動数 f ならびに水中での柱頭
水平変位 $x(z=0)$ の動的応答倍率 M_{max} の差異

管の半径	$r_o = 2.5 \text{ m}$		$r_o = 1.25 \text{ m}$		$r_o = 0.625 \text{ m}$	
空中での 固有振動 数理論値	2.01 Hz		0.996 Hz		0.490 Hz	
分割数 q	空中での 1次固有 振動数 (Hz)	外力振動 数1.0 Hz での 水中での 応答倍率	空中での 1次固有 振動数 (Hz)	外力振動 数 0.605 Hz での 水中での 応答倍率	空中での 1次固有 振動数 (Hz)	外力振動 数 0.36 Hz での 水中での 応答倍率
6	2.007	37.50	0.995	26.20	0.490	15.85
7	2.007	37.24	0.995	25.80	0.490	15.88
8	2.008	40.07	0.995	25.58	0.490	15.53
9	2.008	39.53	0.995	25.27	0.490	15.40
10	2.011	41.60	0.995	25.19	0.489	13.78
11	2.015	41.83	0.996	25.03	0.489	12.12
12	2.023	41.91	0.995	24.87	0.489	12.12
13	2.017	42.24	0.982	23.60	0.489	13.19
14	2.017	42.25	0.996	25.26	0.488	16.18
15	2.022	40.04	0.996	22.84	0.489	16.68

(1990年10月受付)