II-301　　圧縮性流体中の構造物に作用する地震時動水圧の2次元解析

清水建設(株) 大崎研究室　(正)　清川哲志

1. はじめに

北極海、あるいはサハリン沖等、冬期に水表面が氷盤で覆われる海域に重力式石油生産プラットホームのような大型海洋構造物を設置する場合、氷盤の存在が地震時動水圧にどのように影響を及ぼすかという問題は興味深い。本報は一様断面の構造物を対象に、この問題を理論的に検討した結果について述べるものである。

2. 理論解析

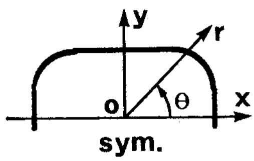
(1) 基礎方程式と一般解

一様断面構造物の場合には2次元問題となることが簡単に示される。図－1に示すように座標系を定義し、構造物は振動方向に対して線対称とする。また、構造物は角振動数 ω で x 軸と平行に調和振動をし、それによって生じる流体運動は、速度ポテンシャル $\phi e^{-i\omega t}$ によって記述されるものとする。本研究では流体の圧縮性を考慮し、速度ポテンシャル ϕ に関する2次元ヘルムホルツ方程式を基礎方程式としている。境界条件は、構造物表面上での構造物の振動速度と流体の運動速度の連続条件、および無限遠方での放射条件である。

この一般解は、極座標 (r,θ) 系で次のように表される。

$$\phi(r,\theta)=\sum_{m=0}^{\infty} C_m H_m^{(1)}\left(\frac{\omega}{c}r\right)\cos m\theta \qquad \cdots(1)$$

ここに、C_m: 複素未定係数、$H_m{}^{(1)}$: 第1種 m次ハンケル関数、c: 水中音速である。



図－1　座標系

(2) 複素未定係数の決定

複素未定係数 $C_m\,(m=0,1,\cdots)$ は、構造物の振動速度と流体の運動速度の連続条件、すなわち次式を満足するように決定される。

$$(n_x\cos\theta+n_y\sin\theta)\sum_{m=0}^{\infty}\left\{\frac{\omega}{c}C_m H_m^{(1)\prime}\left(\frac{\omega}{c}r\right)\right\}\cos m\theta$$

$$\frac{n_x\sin\theta-n_y\cos\theta}{r}\sum_{m=0}^{\infty}\left\{\frac{\omega}{c}C_m H_m^{(1)}\left(\frac{\omega}{c}r\right)\right\}m\sin m\theta=-i\omega\xi_0 n_x \qquad \cdots(2)$$

ここに、n_x, n_y: 構造物表面上の単位法線ベクトルの x, y 成分、$H_m{}^{(1)\prime}$: $H_m{}^{(1)}$ の導関数、ξ_0: 振動の変位振幅。

本報では式(2)を満足する C_m を境界展開法により求めている。すなわち、式(2)の両辺をフーリエ展開し、各次数の係数が等しいとして連立方程式を導き、それを数値的に解くことによって求めている。

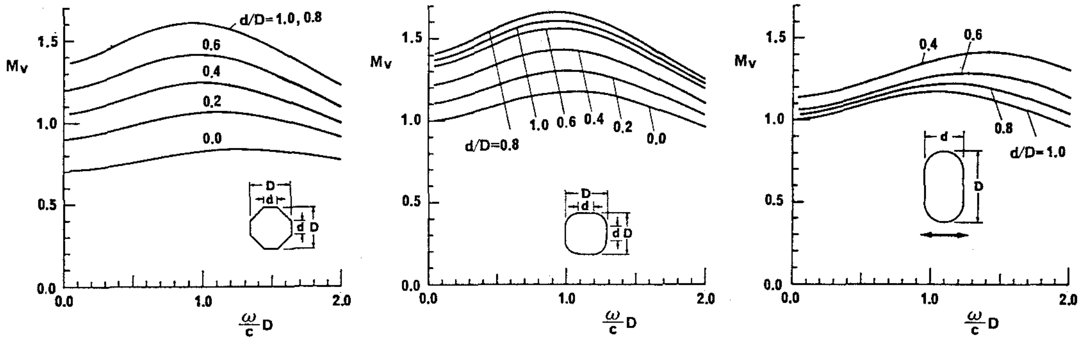
(3) 付加質量係数 M_V の定義

構造物表面上の動水圧 P は、一般化ベルヌーイ方程式の2次の項を無視した $P=i\rho\omega\phi e^{-i\omega t}$（$\rho$: 流体密度）によって求められる。流体力はこの x 方向成分を構造物表面全体にわたって積分することによって得られ、この流体力は振動加速度に比例することが理論から導かれる。ここでは、次式で定義される付加質量係数 M_V を導入して地震時流体力を表す。

$$F_x=M_V(\pi D^2/4)\,a \qquad \cdots(3)$$

ここに、F_x: 流体力、D: 構造物の振動方向への投影幅、a: 振動加速度。

すなわち、地震時に構造物の深さ方向の単位長さ当たりに作用する流体力は、付加質量係数が求められていれば、式(3)により簡便に求めることができる。



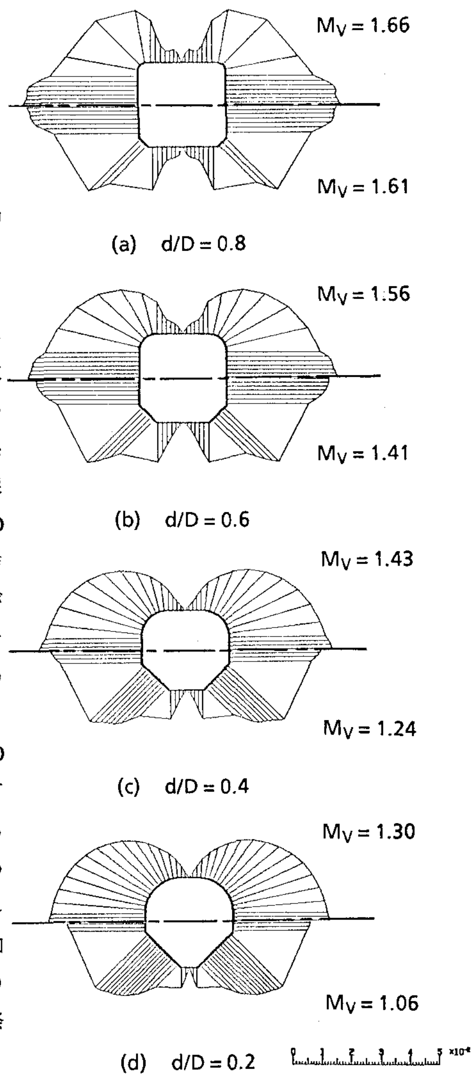
(a) 正方形の角を落とした断面　(b) 正方形の角を丸めた断面　(c) 小判型断面

図－2　付加質量係数の周波数特性

3.数値計算例

図－2は、無次元角振動数に対する付加質量特性を示したもので、(a)~(c)はそれぞれ正方形断面の角を落とした場合および丸めた場合と、水中橋脚等に見られる小判型断面の場合の結果である。いずれも図中に示したd/Dをパラメターとしており、(a)の場合、d/D＝1.0、0.0はそれぞれ正方形断面構造物が辺および対角線に平行に振動する場合の結果を示している。また、(b)の場合、d/D＝1.0は正方形断面、d/D＝0.0は円断面の結果を示している。また、(c)の場合には、d/D＝1.0は円断面の結果を示していることになる。無次元角振動数(ω/c)D＝0は非圧縮の場合に相当するが、これらの結果からわかるように、いずれも流体の圧縮性の影響により付加質量係数、したがって地震時流体力は極大値を持つ。また、興味深いのは、角を落とす場合には落とす割合が大きくなる程(d/Dが小さくなる程)付加質量係数が小さくなるという常識的な結果であるのに対し、角を丸める場合には、d/D＝0.8の方がd/D＝1.0、すなわち正方形断面よりも大きくなっていることである。これは、角を少し丸めるよりは、正方形断面のままの方が地震時流体力が小さいことを意味している。

図－3は、角を丸めた場合と落とした場合の圧力分布をd/Dを変えて比較したもので、各(a)~(d)で、上が丸めた場合、下が落とした場合である。また、振動方向は図で見て水平である。これからd/Dが小さくなるに従って角を落とす方が丸める場合よりも圧力が小さくなることがわかる。この結果として図－2で示したように、角を落とした方が丸めるよりも付加質量係数が小さくなっているわけである。断面積が異なるので一概にどちらが有利とは言えないが、構造物を設計する際に断面形状が作用流体力に大きく影響することを考慮すべきであろう。



図－3　動水圧分布の比較