

氷盤に閉ざされた重力式海洋構造物まわりの 地震時動水圧の特性

HYDRODYNAMIC PRESSURE ON ICEBOUND OFFSHORE STRUCTURE DURING EARTHQUAKES

森田知志¹・西垣 亮²・小林 浩³

Satoshi MORITA, Makoto NISHIGAKI and Hiroshi KOBAYASHI

¹正会員 工修 (株)熊谷組技術研究所 (〒300-2651 つくば市鬼ヶ窪1043)

²工修 三菱重工業(株)長崎研究所 (〒851-0392 長崎市深堀町5-717-1)

³正会員 工博 ハイテクリサーチ(株) (〒271-0047 松戸市西馬橋幸町112)

The horizontal vibration induced hydrodynamic pressure or force acting on offshore structure surrounded by a large floating ice plate is explored. A numerical calculation procedure is developed using the Green's function method for compressible fluid region around an axisymmetric structure. The ice plate is considered as a rigid or deformable annular plate in the procedure. In case of deformable ice plate, thickness and rigidity of the plate are considered. Besides the analysis, physical model test using the underwater shaking table in ice sea basin is conducted.

Calculated pressure using rigid ice model shows fair agreement with the experimental results. By numerical and experimental results, it is shown that the hydrodynamic pressure on the icebound offshore structure are much greater than that without ice plate, and could be estimated by proposed numerical method.

Key Words : *Offshore structure, hydrodynamic pressure, earthquake, sea ice, green's function*

1. はじめに

オホーツク海沿岸のサハリン大陸棚には石油や天然ガス資源が豊富に埋蔵されており, その開発プロジェクトが周辺各国の企業連合によって進められている。現在までに北極海油田で使用された巨大な石油掘削基地の回航・据付工事が完了しており, プロジェクトの進行に伴って今後とも新たな基地やパイプラインなどの大規模施設が順次整備されていくものと予想される。当該地域は1995年にサハリン北部に大きな被害が生じたように地震の頻発地帯でもあり, また海面が氷盤で閉ざされる期間も長期にわたることから, 大規模施設の設計にはこうした特殊な状況を想定した検討が必要と考えられる。

海洋構造物の地震時動水圧に関しては, これまでの研究により構造物の形状が精密に考慮できるように工夫された各種の数値解析法(たとえば, Morita and Nakamura¹⁾, Sun and Nogami²⁾など)が提案されているけれども, それらのほとんどが開水面を想定したも

のであり氷盤の影響を考慮して検討された例は Kiyokawa and Inada³⁾の研究にみられるに過ぎない。Kiyokawaらの提案した解析法は氷盤を表現するために海面全体を剛体境界としてモデル化したものであり, 解析結果から構造物に作用する動水圧は氷盤の影響によって2倍程度に増加することなどが報告されている。しかしながら, 氷盤の影響として海面全体を剛体境界で置換することの妥当性については検証されておらず, 氷盤の規模や厚さの影響評価と共に検討の余地が広く残されたものとなっている。

本研究では, 動水圧解析法に氷盤の影響を取り入れる際のモデル化の方法に関して, 上記した剛体モデルの他に氷盤の弾性変形を考慮した方法を新たに採用した数値解析法を構築する。そして, 氷海水槽を用いた模型実験による結果との比較や, 数値解析によるパラメトリックスタディを実施して, 各氷盤モデルの妥当性を検討すると共に氷盤規模や厚さの動水圧特性に及ぼす影響についても明らかにするものである。

2. 数値解析法

図-1に示すように、一様水深 h の海域に設置された剛な構造物が水平方向に調和振動している状況を考える。海水は非粘性・圧縮性流体であるとして、その運動を表す速度ポテンシャルが定義されるものとする。構造物周囲の水盤形状は円環状であるものとし、以下に示すような2種類の解析モデルを想定して構造物表面の動水圧に関する解析法を構築した。

- ・剛体水盤モデル：水盤を変位変形のない有限広さの剛体で置換した解析モデル

- ・弾性水盤モデル：水盤を有限広さの浮遊弾性板と考えてその変位変形を考慮した解析モデル

解析では構造物および水盤は軸対称形状であるものと仮定しており、各々の形状は図-1中に示したように一連の線素分 ΔS_j ($j=1 \sim N_s, N_s+1 \sim N$) によって表現されているものとする。

(1) 剛体水盤モデル

この場合には水盤形状を追加することにより、開水面を想定した既発表の3次元解析法で対処可能であるが、ここでは計算の効率化と弾性水盤モデルへの拡張性を考慮して軸対称型の解析法を採用することとした。以下に示す各々の基礎式はMorita and Nakamura¹⁾による解析法を参照し、座標系を円筒座標系に変換すると共に軸対称形状を仮定して誘導したものである。

a) 基礎方程式と境界条件

速度ポテンシャルの空間変動項 ϕ_D の満足すべき基礎方程式と境界条件は以下のとおりである。

$$\frac{\partial^2 \phi_D}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_D}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi_D}{\partial z^2} + k_0^2 \phi_D = 0 \quad (1)$$

$$\phi_D = 0 \quad (z=0) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial z} + \frac{\sqrt{-1} k_0}{\beta} \phi_D = 0 \quad (z=-h) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} = -\sqrt{-1} \omega n_r x \quad (\text{on Body}) \quad (4)$$

ここに、 $\beta = \rho_S C_S / \rho_0 C_0$, $k_0 = \omega / C_0$, ρ_S, C_S : 海底材料中での密度および圧力波(P波)の波速, ρ_0, C_0 : 海水の密度および圧力波の波速, $n=(n_r, n_z)$: 構造物表面 (r, z) 上に立てた外向き単位法線ベクトル, x : 水平振動の変位振幅, ω : 角振動数を表す。

式(3)中の β は海水と海底材料との音響インピーダンスの比率を表し、これにより海底地盤の材料特性が考慮できるものとなっている。

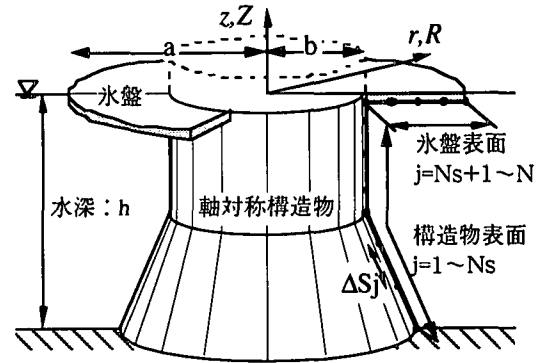


図-1 解析モデルおよび座標系

b) 速度ポテンシャルの表示

式(1)~(4)を満足する ϕ_D は、境界積分法の一種であるわきだし分布法により、次のように表示できる。

$$\phi_D(r, z) = 2\pi \sum_{j=1}^N f_D(R_j, Z_j) \cdot P_j(r, z) \quad (5)$$

ここに、 f_D は式(4)を満足させるために構造物表面に配置したわきだしの強度関数である。各々の線素分上での f_D は次の連立方程式を解いて決定される。

$$2\pi \sum_{j=1}^N f_D(R_j, Z_j) Q_{i,j} = \begin{cases} -\sqrt{-1} \omega(n_r)_i x \cdots & (i=1 \dots N_s) \\ 0 \cdots & (i=N_s+1 \dots N) \end{cases} \quad (6)$$

P_j と $Q_{i,j}$ は式(9)に示すGreen関数を用いて、次のように表示される。

$$P_j(r, z) = \int_{\Delta S_j} R_j \cdot G(r, z; R, Z) \cdot dS(R, Z) \quad (7)$$

$$Q_{i,j} = \int_{\Delta S_j} R_j \frac{\partial}{\partial n_i} G(r_i, z_i; R, Z) \cdot dS(R, Z) \quad (8)$$

$$G(r, z; R, Z) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sinh(k_n z) \cdot \sinh(k_n Z) \times I_1\left(-\sqrt{-1} u_n \frac{R}{r}\right) \cdot K_1\left(-\sqrt{-1} u_n \frac{r}{R}\right) \quad (r > R) : \text{複号同順} \quad (9)$$

ここに、

$$C_n = \frac{2(k_n^2 + q^2)}{(k_n^2 + q^2)h + \sqrt{-1}q} \quad (10)$$

$q = k_0 / \beta$, $u_n^2 = k_n^2 + k_0^2$, I_1, K_1 : 1次の第一種および第二種変形ベッセル関数である。また複素数 k_n は式(11)を解いて求められる。

$$k_n \cdot \cosh(k_n h) - \sqrt{-1}q \cdot \sinh(k_n h) = 0 \quad (n=1 \dots \infty) \quad (11)$$

式(9)に示したGreen関数には $i=j$ の条件下で発散する対数型の特異関数が含まれているため、その積分関数である P_j や $Q_{i,j}$ の計算には工夫を要

する。ここではMorita and Nakamura¹⁾による手法を応用して計算処理を行っているが、詳細な説明については紙面の制約により割愛したい。

c) 動水圧と流体力の表示

以上の計算により流体中の任意点での速度ポテンシャル ϕ_D を求めることができ、したがって、構造物子午線上での動水圧の複素振幅 p_D が次式により算定される。

$$p_D(r, z) = \sqrt{-1} \rho_o \omega \phi_D(r, z) \quad (12)$$

構造物全体に作用する水平力の複素振幅 F_D の算定式は次のとおりである。

$$F_D = -\sqrt{-1} \pi \rho_o \omega \sum_{j=1}^{N_s} (n_r)_j r_j \phi_D(r_j, z_j) \Delta S_j \quad (13)$$

(2) 弾性氷盤モデル

a) 円環氷盤の振動方程式

構造物の周囲の氷盤は、図-2に示すように、内縁半径 b 、外縁半径 a 、厚さ d の様な弾性環状浮体としてモデル化し、流体解析との連成化の準備として自由振動時の固有モード解析⁴⁾を行っておく。ここでも(1)節での展開と同様に円筒座標系を採用し、氷盤の弾性振動は固有振動モードの重ね合わせで表されるものとして、鉛直変位 $W(r, \theta, t)$ を式(14)のように表示しておく。

$$W(r, \theta; t) = \sum_{m=0}^M A_m(t) \cdot U_m(r) \cdot \cos \theta \quad (14)$$

ここに、

$$A_m(t) = a_m \cdot \exp(-\sqrt{-1} \omega_m t) \quad (15)$$

ω_m : 固有角振動数, a_m : モード振幅, M : 解析で考慮する振動モードの上限値である。

薄板の曲げ振動方程式に浮力の効果を考慮し、式(14)を代入すると m 次モードの固有振動形状 $U_m(r)$ に関する基礎方程式を次のように導くことができる。

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \frac{1}{r^2} \right) \left(\frac{d^2 U_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_m}{dr} - \frac{1}{r^2} U_m \right) - \alpha_m^4 U_m = 0 \quad (16)$$

$$\alpha_m^4 = \frac{12(1-\nu^2)(\rho_c d \omega_m^2 - \rho_o g)}{E d^3} \quad (17)$$

ここに、 ρ_c : 氷盤の密度, ν : ポアソン比, E : ヤング係数, g : 重力加速度である。

式(16)を満足する固有振動数 ω_m は無数に存在し、値の小さいものから順に添字 m を $0, 1, 2, \dots$ として表すこととする。0次モードの固有振動数と特性形状は次のように求められる。

$$\omega_o^2 = \rho_o g / \rho_c d \quad (18)$$

$$U_o(r) = 2r / \sqrt{a^2 + b^2} \quad (19)$$

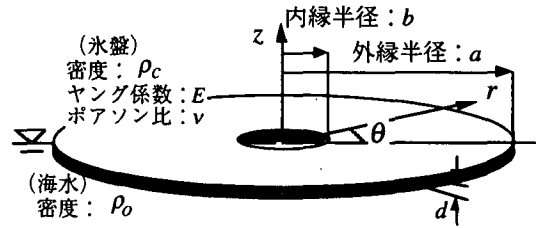


図-2 弾性環状浮体

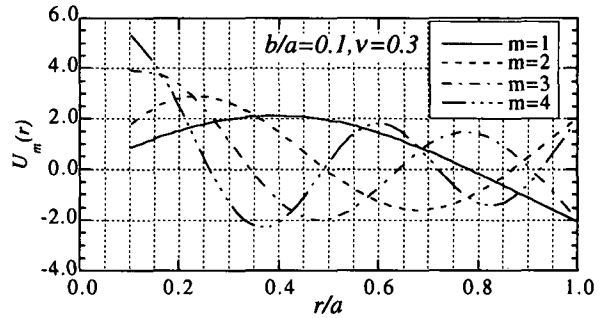


図-3 環状氷盤の固有振動形状

式(19)は氷盤自体の変形を伴わない剛体振動、すなわち船舶工学でのピッチング運動に対応している。

$m > 0$ の場合には、特性形状 $U_m(r)$ の一般解が次のように与えられる。

$$U_m(r) = C_1^m J_1(\alpha_m r) + C_2^m Y_1(\alpha_m r) + C_3^m I_1(\alpha_m r) + C_4^m K_1(\alpha_m r) \quad (20)$$

ここに、 J_n, Y_n : 1次の第一種および第二種ベッセル関数である。

式(20)を、氷盤の内縁および外縁における境界条件、すなわち $r=a, b$ で曲げモーメントと支点反力がゼロであることを規定した4つの条件式に代入し、未定常数 $C_1^m \sim C_4^m$ に関する係数マトリックスの固有値と固有ベクトルを数値的に求めて ω_m と $U_m(r)$ を決定した。なお、特性形状は式(21)によって正規化された直交関数形を構成している。 $b/a=0.1, \nu=0.3$ の環状円盤について特性形状の算定例を図-3に示す。

$$\int_{-\pi}^{\pi} \int_b^a r \{U_m(r) \cdot \cos \theta\}^2 dr d\theta = \pi(a^2 - b^2) \quad (21)$$

以上で決定した固有振動数と特性形状により、各モードにおける振動方程式が次式のように表される。

$$\rho_c d(a^2 - b^2)(\omega_m^2 - \omega^2) a_m = \int_b^a r U_m(r) p_t(r, z) \Big|_{z=-d} dr \quad (22)$$

ここに、 $p_t(r, z)$ は氷盤の変形を考慮した、最終的に求めるべき動水圧分布を示す。

b) 発散波の速度ポテンシャルの表示

静止した構造物の周囲で氷盤が m 次モードの特性形状に従って単位モード振幅で調和振動している場合の速度ポテンシャル ϕ_R^m の表示式は、式(5)の場合と同様に、以下のように表される。

$$\phi_R^m(r, z) = 2\pi \sum_{j=1}^N f_R^m(R_j, Z_j) \cdot P_j(r, z) \quad (m=0, 1, 2, \dots) \quad (23)$$

f_R^m の決定方程式は式(24)のとおりである。

$$2\pi \sum_{j=1}^N f_R^m(R_j, Z_j) Q_{i,j} = \begin{cases} 0 & \dots (i=1 \dots Ns) \\ \sqrt{-1} \omega U_m(r_i) & \dots (i=Ns+1 \dots N) \end{cases} \quad (24)$$

式(5)および(23)で求められた速度ポテンシャルを合成することによって、動水圧 $p_f(r, z)$ の表示式が次式のように求められる。

$$p_f(r, z) = \sqrt{-1} \rho_o \omega \left\{ \phi_D(r, z) + \sum_{m=0}^M a_m \phi_R^m(r, z) \right\} \quad (25)$$

c) 氷盤の応答変位の算定

式(25)を式(22)に代入し、多少の整理を行うと次式が得られる。

$$\rho_c d(a^2 - b^2)(\omega_n^2 - \omega^2) a_n - \sum_{m=0}^M a_m F_{n,m}^R = F_n^D \quad (n=0, 1, 2, \dots, M) \quad (26)$$

ここに、

$$F_n^D = \sqrt{-1} \rho_o \omega \sum_{j=Ns+1}^N r_j U_n(r_j) \phi_D(r_j, z_j) \Delta S_j \quad (27)$$

$$F_{n,m}^R = \sqrt{-1} \rho_o \omega \sum_{j=Ns+1}^N r_j U_n(r_j) \phi_R^m(r_j, z_j) \Delta S_j \quad (28)$$

式(26)は、未知数 a_n に関する $(M+1)$ 元連立方程式であり、これを解くことによって各モード振幅が確定し、構造物の水平振動によって引き起こされる氷盤の弾性変形が求められる。なお、対象とする氷盤振動モードの最高次数 M は振動の周波数と M 次モードの固有振動数とを勘案して決定した。

最終的な動水圧分布は、得られたモード振幅を式(25)に代入して求められる。

3. 傾斜壁タイプ構造物を対象とした実験結果との比較

(1) 実験の概要と計算条件

実験⁹⁾は三菱重工業(株)長崎研究所の氷海水槽(長さ20m, 幅9m, 標準水深2.3m)を用いて行った。この施設には冷却装置が備えられ、水面全域に一律な氷盤を生成することができる。槽内には図-4に示すような水中加振装置を設置し、構造物模型を水平加振して加速度や動水圧の測定を実施した。

実験模型は縮尺1/60として図-5(a)に示すように製作した。模型表面には水深方向5カ所(No.1~5)に至ゲージ式の水圧計を取付けた。

実験では実海域で予想される状況を想定し、氷盤の物性や形態を変化させて多様な条件下で測定が行

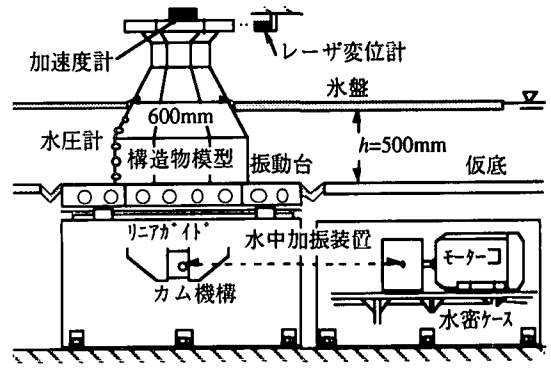


図-4 水中加振装置

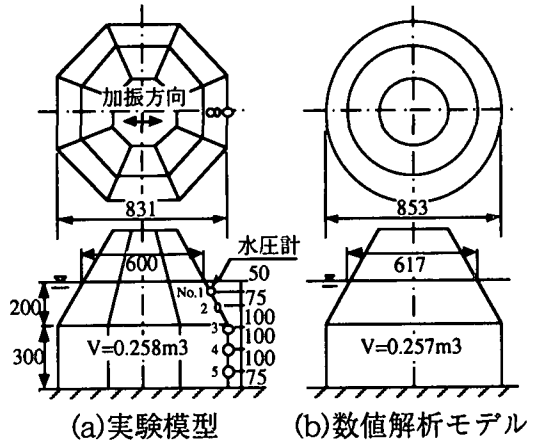


図-5 実験模型と解析モデル

われたが、ここでは解析結果との比較に重点を置き、計算条件と対応づけの可能な場合の結果のみ報告することとした。解析で対象とした構造物を図-5(b)に、氷盤の物性と加振条件を表-1に示す。

表-1 氷盤の物性と加振条件

	水槽実験	数値解析
氷盤のヤング係数 E	34.3~41.3MPa	41.7MPa
氷盤のポアソン比 ν	-	0.3
氷盤厚さ d	35.2mm	33.3mm
加振周波数 f	2.5Hz	2.5Hz
振動振幅 x	3.5~5.0mm	-

(2) 動水圧特性に関する比較

実験では模型と氷盤との付着力を高めた上で、模型から所定の距離離れた位置に直線状の切込をあらかじめ施した状態で動水圧の測定が実施されているが、こうした実験結果からは切込の位置によって大きく変動する動水圧特性が得られている。ここでは数値解析において氷盤の規模を変化させて解析を行い、実験結果との比較を行う。ただし、図-6に示すように実験で扱われた氷盤は水槽設備上の制約もあ

ってかなり複雑な台形状の平面形状をしているのに対し、数値解析では円盤状に簡略化された氷盤を仮定したものとなっている。切込の位置を解析でどのように考慮するか問題であるが、ここでは数値解析での円環氷盤の外縁半径を切込の位置とみなした。

図-7は構造物表面の動水圧振幅の鉛直分布について、実験結果と剛体氷盤モデルによる計算結果を示すもので、 $a'=0$ (氷なし)~ 0.7m の範囲について氷盤の切込位置(外縁半径)の影響についてみる事ができる。氷盤なしの場合の動水圧の鉛直分布は、鉛直位置が深くなると共に単調に増加する傾向を示しており、計算値と実験値はよく一致しているのがわかる。そして氷盤ありの場合には、特に浅い位置での動水圧が大きく増加することによって鉛直方向に一樣な分布を示すようになることや、こうした傾向は a' が大きいくほど顕著であること、実験結果と計算結果の対応は概ね良好であることなどがわかる。

弾性氷盤モデルによる同様の比較を図-8に示す。この場合には円環氷盤の変形を考慮したことによって動水圧の計算結果は全体的に減少し、 $a'=0.4\text{m}$ 程度以下の動水圧は氷盤を無視した場合の結果とほとんど変わらない。計算結果は実験結果を大きく下回って出現しており、この場合には弾性氷盤モデルよりも剛体氷盤モデルの方が妥当であるものと言える。前述したように解析と実験では対象としている氷盤形状が異なり、 a' の比較的小さい状況下では実験における氷盤の変形は計算で推定したほど大きく現れていないものと思われる。

図-9は、No.3($z=-0.225\text{m}$)の動水圧計測ポイントについて、より広い範囲に設定した a' と動水圧振幅との関係を示す。実験結果は、 a' が 0.5m 程度以下におい

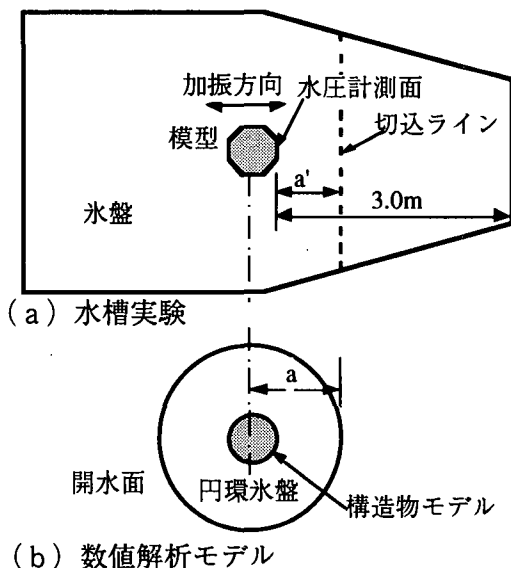


図-6 実験および解析で対象とした氷盤形状

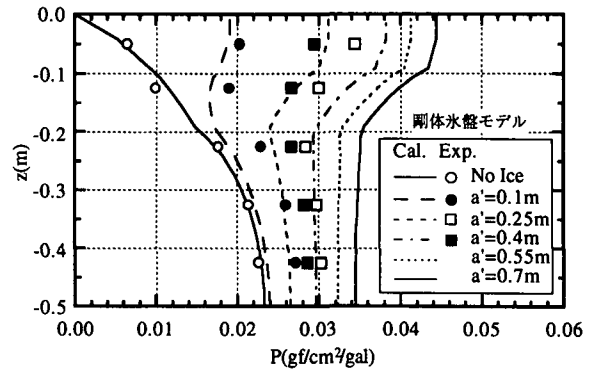


図-7 実験結果と剛体氷盤モデルによる解析結果の比較

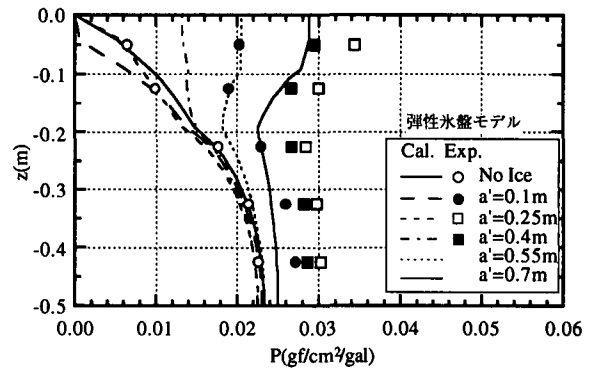


図-8 実験結果と弾性氷盤モデルによる解析結果の比較

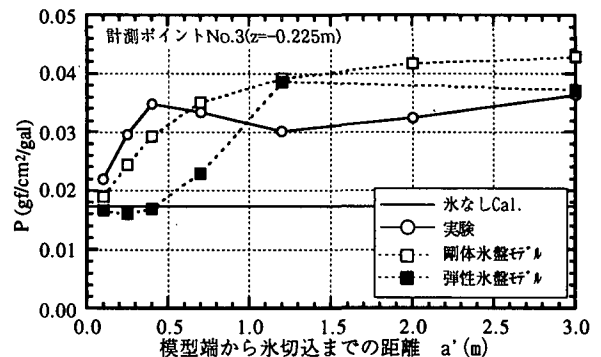


図-9 氷盤上の切込位置による動水圧の変動特性

では a' の増加と共に急激に増大し、剛体氷盤モデルによる計算結果にはほぼ対応しているものの、 $a'>0.5\text{m}$ の領域では変動が少なくなると共に剛体氷盤モデルによる計算結果を下回るように出現している。そして $a'=3.0\text{m}$ になると実験結果と弾性氷盤モデルによる計算結果との差異が少なくなっているが、これは両者での氷盤全体の規模が等価なものとなり計算に対応した氷盤の弾性挙動が実験で現れるようになったものと推測される。

以上で示したように、氷盤に閉ざされた構造物に作用する動水圧は増加する傾向を示すものの、影響が顕著となるのは構造物の周囲のかなり広い範囲に

まとまった氷盤が存在する場合であることなどが明らかとなった。

4. 円柱構造物に作用する地震時流体力の特性

水深30mの海域に設置された半径 $b=20\text{m}$ の円柱構造物が水平振動する状況を想定して、構造物に作用する水平流体力（付加質量係数，等価線形減衰力係数）の算定を行った。着目したパラメータとその範囲は，振動周波数 $f: 0.5\sim 10\text{Hz}$ ，氷盤外縁半径 $a: 50\sim 600\text{m}$ ，氷厚 $d: 0.5\sim 2.0\text{m}$ ，海底面の音響インピーダンス比 $\beta=5$ （岩盤に相当），のとおりである。氷盤の物性値は，ヤング係数 $E=3.5\text{GPa}$ ，密度 $\rho_c=0.9\text{g/cm}^3$ に設定した。

氷厚条件ごとに計算した付加質量係数および減衰力係数の氷盤半径による変動傾向を図-10と11に示す。なお各図中での結果は，傾向がわかりやすいように，計算した全周波数帯（ $0.5\sim 10\text{Hz}$ ）にわたる平均値として示してあり，平均処理の方法に依存したものであることを付記しておく。

これらの図より，弾性氷盤モデルによる地震時流体力の算定結果は，氷盤規模が小さいうちは氷なしの場合の結果にほぼ等しいものの，氷盤規模が大きくなると共に増加して剛体氷盤モデルの結果に漸近する傾向にあることがわかる。また，氷厚が増加すると氷盤の剛性が増加して地震時流体力の増大化を招くことなどが確認された。

5. 結 語

氷盤に閉ざされた海洋構造物を想定して，地震時動水圧の解析法を提案すると共に，氷海水槽による実験結果やパラメトリックスタディにより，2種類の氷盤モデルに関する比較検討と，氷盤の影響について考察した。その結果，動水圧特性は氷盤規模や氷厚によって大きく増減することなどが確認された。特に，氷盤の影響が顕著となるのは構造物周囲の広い範囲にまとまった状態で存在する場合であることが判明し，耐震設計手法を考える上で興味深い結果が得られたものと考えられる。

謝辞：本研究は(社)日本海洋開発産業協会が主管する水荷重基礎研究委員会において，活動の一環として実施された。貴重な助言を頂いた委員各位に謝意を

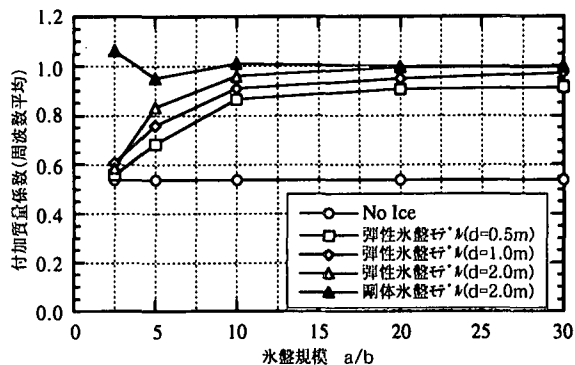


図-10 氷盤条件による付加質量係数の変動傾向

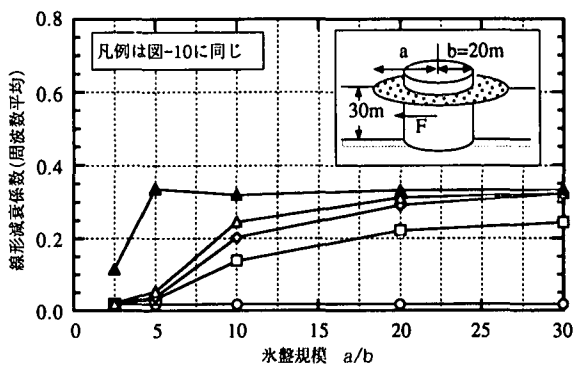


図-11 氷盤条件による線形減衰係数の変動傾向

表する次第である。

参考文献

- 1) Morita, S. and Nakamura, T.: Hydrodynamic pressure on massive structure under partial reflective bottom condition during earthquakes, *16-th International Conference on OMAE*, Vol. II, pp.275-282, 1997.
- 2) Sun, K. and Nogami, T.: Earthquake induced hydrodynamic pressure on axisymmetric offshore structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.20, pp.429-440, 1991.
- 3) Kiyokawa, T. and Inada, H.: Hydrodynamic forces acting on axisymmetric bodies immersed in ice covered sea during earthquakes, *Eighth International Conference on OMAE*, Vol. II, pp.153-160, 1989.
- 4) Vogel, S.M. and Skinner, D.W.: Natural frequencies of transversely vibrating uniform annular plates, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.32, pp.926-931, 1965.
- 5) (社)日本海洋開発産業協会：平成10年度海洋石油開発技術調査 成果報告書，(印刷中)

(1999.4.19 受付)