

# 氷盤の移動による柱状構造物の振動特性

土屋正彦\*・蟹江俊仁\*・池尻一仁\*  
吉田 明\*・佐伯 浩\*\*

## 1. まえがき

北極海、ベーリング海、オホーツク海それにボスニア湾等、冬期間海水の凍結する海岸・海洋に構造物を建設する場合、種々の氷氷による力を考慮せねばならない。特に、モノポッドタイプの海洋構造物や海中燈台のようなアスペクト比（構造物の代表径÷氷厚）の小さい、比較的スレンダーな構造物においては、移動する氷盤の断続的破壊により、周期的な水力を受けることになり、ある条件下では構造物が共振現象を起こすことが予想される。Bjork(1981)はボスニア湾に建設されている海中燈台の海水氷盤移動による被害を詳細に調べている。この海域の平均的な氷厚は、年による変動はあるが60~100 cm程度であり、海水の融解期である3~4月にかけては氷盤の移動量も大きく70 km程度以上であることが確認されている。Vallinsgrund 燈台の場合は、水深7.7 mの位置に直径10 mのケーソンが設置され、それに直径3 mの円筒形のコンクリート製燈台が、-5.7 mの位置で6本のロックアンカーで固定されていた。1977年の観測では、氷盤来襲時には激しい振動があり、一部ロックアンカーがゆるんでいたようであるが、1979年倒壊した。この時の平担氷の氷厚は45~65 cmであった。結論はIce Ridgeが原因とされているが、ロックアンカーおよびコンクリート部材の氷盤移動による断続的水荷重による振動により、ロックアンカーおよびコンクリート部材がかなり被劣していたことも考えられる。またNorströmsgrung 燈台は-14.5 mの地点に建設され、-6.7 mまでは直径23 mの基礎ケーソンで、その上に直径7.2 mのコンクリート製燈台が接合されている。1971~1972年の冬期に燈台の検査が行れたが、その時は激しい振動で、最大水平加速度は0.1 gであり、卓越振動周期は2.8 Hzであった。1972年夏の検査では異常が認められなかったが、1973の検査では燈台基部に大きな水平クラックが発見されたが、これは振動による材料の疲労によるものと考えられている。Kemi I 鋼製燈台は全水力を軽減する

ため、非常にスレンダーな構造とし、かつ氷盤との接触部分を傾斜していた。水深は12 mで、水際線の直径は1 mであった。1973年に建設されたが、振動が激しく、1973~1974年にかけての冬期に、燈台の器具類が多数振動により破壊した。そして1974年5月に完全に破壊した。海底面上2 mの位置の溶接部分で破壊が起っていた。構造物の激しい振動が破壊を早めたと言われている。このKemi I 燈台の倒壊後、氷海域における海洋構造物の動特性の研究が活発化してきた。以上述べたように、移動する氷盤の断続的な破壊は構造物に振動を与える。また、この振動は高い応力レベルでの振動であるので、共振現象は発生しない場合でも構造材料の疲労を促進することになる。本研究は、オホーツク海に面したサロマ湖の海水を用いて、アスペクト比の小さい直立構造物の移動する氷盤による動特性を系統的な実験より明らかにするとともに、実験結果に基づいて得られた海水と構造物間の相互作用モデルを提案し、Matlock等(1969)のモデルとの比較を行ったものである。

## 2. 実験方法

実験は全て、サロマ湖の海水（塩分量3~6‰）を用いて行われた。実験装置を図-1に示す。氷盤は台車に固定され、油圧ジャッキを用いて模型杭に押しつけられる。ジャッキの押し出し速度は载荷中一定速度を保ち、その速度  $V$  は0.05~6.4 cm/secの範囲で実験を行っ

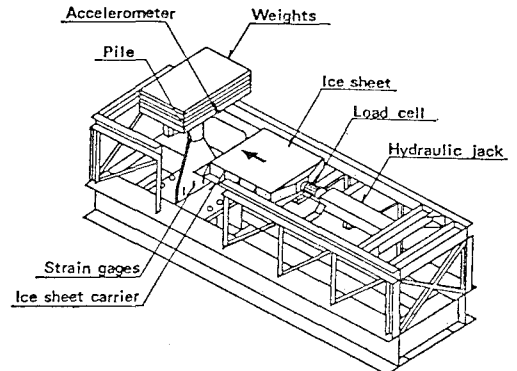


図-1 実験装置

\* 正会員 工修 大成建設(株) 土木設計部

\*\* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

表-1 模型杭の振動特性

Model structure	Natural frequency(rad/s)	Lateral stiffness(N/cm)	Damping
P1	$\infty$	$\infty$	---
P2	18.2	10600	0.0010
P3	29.3	10600	0.0012

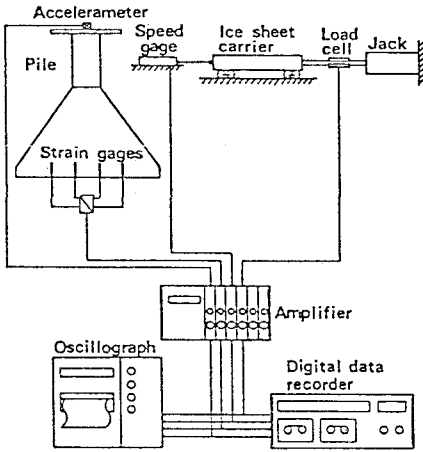


図-2 振動特性計測システム

た。これは歪速度 ( $\dot{\epsilon} = V/4D$ ,  $\dot{\epsilon}$ : 歪速度,  $V$ : 氷盤の移動速度,  $D$ : 杭径) に換算して  $1.6 \times 10^{-3} \sim 2.1 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$  に対応することになる。模型杭と氷盤の接触部の断面形状は、直径 7.6 cm の円断面となっていて、この模型杭の固有振動数は杭上部に搭載した荷重載荷板の増減によって調整可能となっている。本実験では表-1 に示す3通りの固有振動数を主として用いた。但し表中の P1 の固有振動数無限大のケースは、氷盤接触部と同一水平面で杭の変位を拘束したものである。測定項目は図-2 に示すように、氷力 (ジャッキと氷盤の間に設置した Load Cell にて測定)、模型杭頭部の加速度 (杭頭部に加速度計設置)、模型杭基部の歪 (模型杭基部に歪ゲージ設置) それに氷盤の移動速度 (氷盤移動台車の速度を変位計にて計測) の4項目である。用いた海氷は、サロマ湖の自然結氷盤を  $2\text{m} \times 20\text{m}$  切り抜き新たに結氷させた海氷盤の良質な部分 (完全な柱状氷) から厚さ 5 cm, 幅 60 cm, 長さ 110 cm の氷盤を切り出し整形して用いた。また、図-1 に示す実験装置自体の振動を抑制するため、模型杭の部分以外は実験装置の下部 1/3 を雪を凍結させることにより拘束した。また模型杭の基部は矩形断面で完全な Fix 構造となっている。

### 3. 実験結果

二つの氷盤の移動速度 (7.6 mm/sec, 39.5 mm/sec) に対する杭頭の変位と水平方向氷力の経時変化を示した

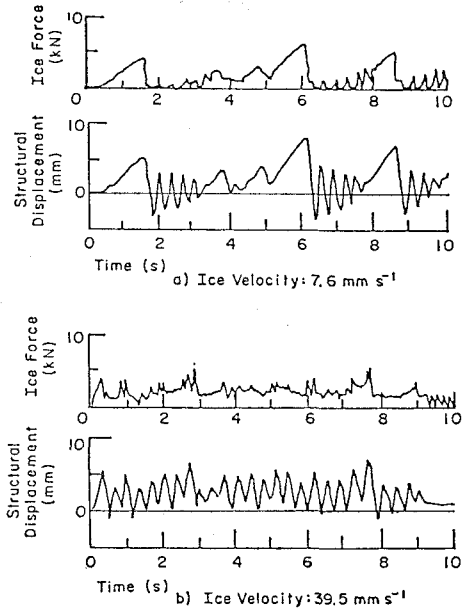


図-3 典型的な氷力及び変位の経時変化 (P2)

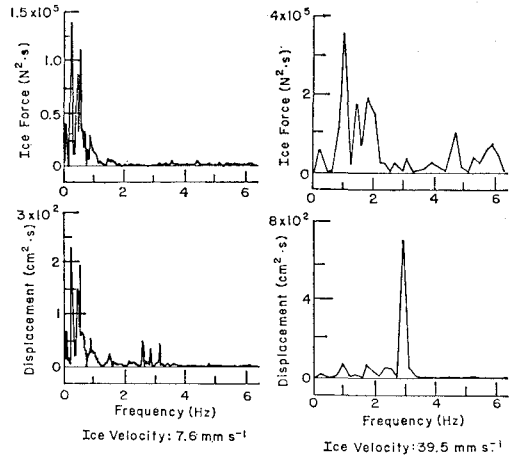


図-4 低・高歪速度時の変位と氷力のスペクトル密度 (P2)

ものが図-3である。この時の模型杭は P2 の条件で個有周波数は 2.89 Hz である。また  $V=7.6 \text{ mm/sec}$  と  $39.5 \text{ mm/sec}$  はそれぞれ歪速度に換算すると、 $2.5 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$  と  $1.3 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$  に対応する。図からも明らかのように、低歪速度の場合は大きな破壊が長い周期で発生していることを示しているし、氷盤の破壊後一時氷力はゼロとなり、杭も氷盤側に変形し自励振動している。これに対して高歪速度の場合には小さな破壊が短い周期で発生し、氷力は、ある一定レベル以上で変動している。また、この時の杭の変位は、氷盤方向へ撓むことはほとんどなく、氷盤の移動速度が速いため氷盤側 (一

側)の変形が拘束されていることを示している。次にこの二つのケースについて、氷力と杭頭変位のスペクトル密度を計算した結果が図-4である。低歪速度の場合は、氷力については、固有周波数(2.89 Hz)より小さい1 Hz以下の領域にスペクトル密度が高くでいて、固有周波数近傍のスペクトル密度は小さい。しかし変位スペクトルで見ると固有周波数近傍に小さなピークが見られる。これに対して高歪速度の場合には、氷力のスペクトル密度は広い周波数帯に分布しているが、固有周波数でのスペクトル密度は小さい。これに対して変位スペクトル密度は、固有周波数のところで明確なピークを示している。歪速度が  $\epsilon < 10^{-2} \text{sec}^{-1}$  の範囲では、Peyton (1968)や Saeki (1984)が同様な実験を行っているが、本実験の低歪速度の場合と良い一致を示している。

4. 実験結果の考察

まず、表-1に示した3種類(P1, P2, P3)の構造物に作用する最大氷力と歪速度の関係を調べた結果が、図-5である。P1~P3ともに、歪速度が大きくなるに

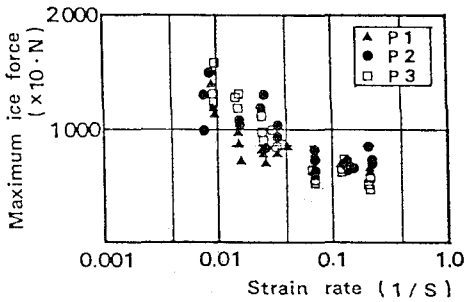


図-5 最大氷力と歪速度の関係

つれて最大氷力は小さくなることを示している。Saeki等(1977)や Schwarz(1970)は全氷力と歪速度の関係をP1の条件で詳細な実験を行っているが、その結果によると歪速度が  $10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$  の範囲で最も大きい氷力を示し、歪速度の増加とともに、最大氷力は小さくなることを示しているが、著者等の結果もそれらの結果と良い一致を示している。また、図からも明らかのように、剛性の等しい杭状の構造物では、杭に作用する最大氷力は、その杭の固有振動数には依存しないことが明らかとなった。

次に、P2とP3の模型杭に対する最大と最小の応答変位と歪速度の関係を示したものが図-6である。プラスが氷盤の進行方向と同じ方向の変位、マイナスが氷盤方向の変位を示し、その差が応答振幅である。応答振幅は、歪速度の増加とともに減少し、また、P2, P3の最大・最小の応答変位と最大応答振幅には有意な差は見ら

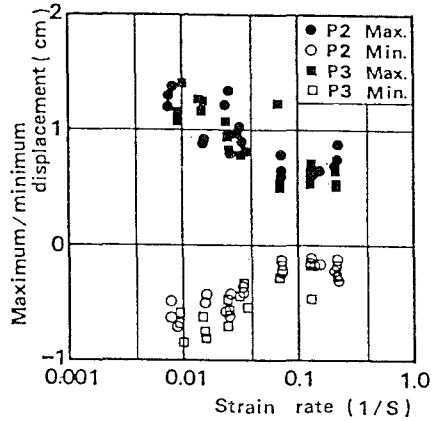


図-6 最大・最小応答変位と歪速度の関係

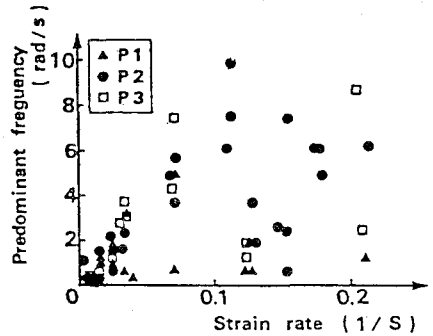


図-7 氷力の卓越振動数と歪速度の関係

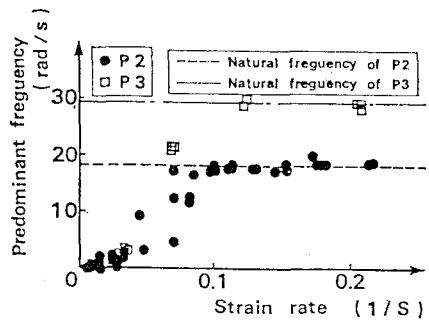


図-8 変位の卓越振動数と歪速度の関係

れなかった。この事実は、杭構造物の応答変位や応答振幅が杭の固有振動数に依存しないことを意味している。これは流体力を受ける杭構造物とは違って、大気と氷盤が不連続になっていて、破壊した氷盤の edge が杭の振動を抑制するためである。次に氷力と応答変位の卓越振動数と歪速度の関係を調べたものが図-7、図-8である。図-7はP1, P2, P3の模型杭に対する氷力の卓越振動数と歪速度の関係を調べたものであるが、図-4の例にもあるように、高歪速度領域では卓越振動数が明確には現れず、

またばらつきも大きいので特別な傾向は見られなかった。従って、ここではパワーが最大となる振動数をプロットした。P2 と P3 の場合は、データの分散は大きいものの、低歪速度領域では卓越振動数と歪速度の間に比例関係が見られる。この氷力の卓越周波数については、Sodhi等(1986)も詳細な実験を行っていて、著者等の実験と同じアスペクト比1.52では、卓越周波数  $f$  は  $f=(15 \sim 60) \times \epsilon$  ( $\epsilon$  は歪速度) となり、卓越周波数と歪速度が直線関係であることを示して、著者等の結果と歪速度の小さい範囲では、ほぼ一致している。次に、図-8は、P2 と P3 の変位の卓越振動数を調べたものである。卓越振動数は歪速度の増大とともに大きくなるが、固有振動数に達すると、歪速度が大きくなっても、それ以上卓越振動数は大きくなり一定値を示す。

4. 柱状構造物の動特性に対する理論モデル

移動する氷盤と構造物の動的相互作用の数学モデルはいくつか提案されているが、本論文では最も単純なMatlockのモデルの改良を試みた。Matlockの基本式は次式で示される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $M$  は質量、 $K$  はバネ定数、 $C$  は減衰係数で  $F(t)$  は氷力である。また  $x$ ,  $\dot{x}$  それに  $\ddot{x}$  は変位、速度それに加速度である。この力学モデルを図-9に示す。

Matlockモデルの特徴は図-10に示すように、応答氷力を鋸歯状とし、そのピーク値は一定としているのに対

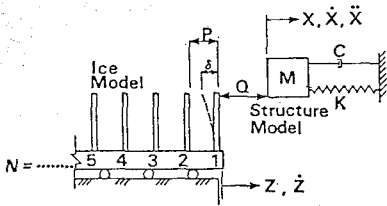


図-9 Matlockの力学モデル

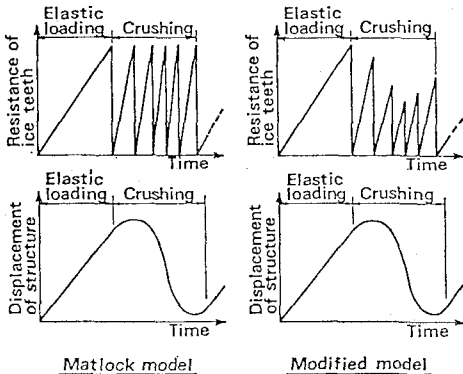


図-10 作用外力モデルの違い

し、著者等は図-3の氷力の経時変化にも見られるように、ピーク値を変化させた修正モデルを提案する。これは氷強度の歪速度依存性を考慮したもので、以下の特徴を有している。①氷盤は連続的に移動する弾性要素の列として表わされる。②弾性要素(氷盤)の強度は質点と要素の相対速度の関数として表わされる。特に②の根拠は、著者等のみならず Sodhi等(1986)や Maattanen等(1983)の実験結果に基づいたものである。図-11に著者

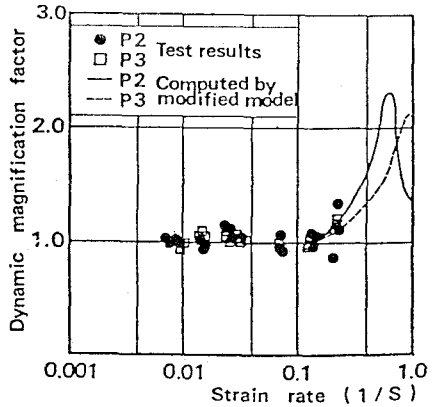


図-11 動的応答倍率と歪速度の関係

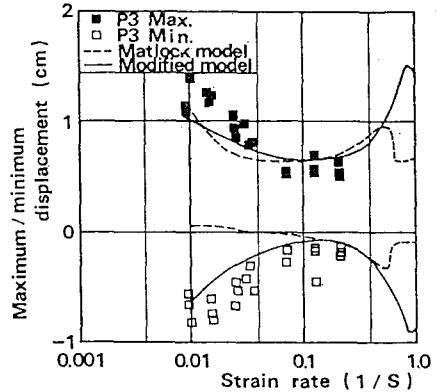
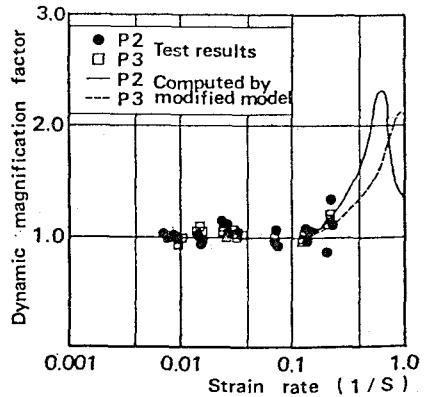


図-12 P2 と P3 の最大・最小変位の比較

等の提案したモデルで計算した動的応答倍率と歪速度の関係を実験値と比較したものである。この動的応答倍率とは、杭の最大応答変位を最大氷力が静的に作用したと仮定した時に計算される杭の変位で除した値である。P3ともに、ほとんど全歪速度領域で1.0に近いが、歪速P2、度が  $0.2 \text{ sec}^{-1}$  を越えると動的応答倍率は1.0を越えて、本実験では歪速度  $0.3 \text{ sec}^{-1}$  で1.2となっている。また計算値は実験値と良い一致を示している。

次に、P2とP3の最大と最小の変位の実験値と著者等と Matlock 等のモデルによる計算結果との比較をしたものが図-12である。まず最大変位量については、P2、P3ともに、歪速度が  $0.05 \sim 0.2 \text{ sec}^{-1}$  の範囲では、著者等のモデルと実験値は良い一致を示している。また、歪速度が  $0.05 \text{ sec}^{-1}$  より小さくなると計算値の方が小さな変位量となる。また、Matlock 等のモデルと著者等のモデルを最大変位で比較すると、P2の場合は歪速度が  $0.3 \text{ sec}^{-1}$  以下では大きな差はないが、それより大きくなると差も大きくなる。またP3の場合は0.5を越えると両モデルの差が大きくなる。次に最小変位で比較してみると、著者等のモデルの方が実験値により近い値を示す。以上の結果から判断して、著者等のモデルの方が Matlock 等のそれより、より実用的と考えられる。

## 5. 結 論

(1) 海氷盤の移動に伴う氷盤の断続的破壊により、スレンダーな構造物は振動し、それによる構造物の被害例を示すとともに、被害の実体は共振現象とともに構造物材料の高い応力レベルでの振動による疲労現象であることを示した。

(2) 氷盤の破壊に伴う柱状構造物の動特性を試験するための実験装置を新に開発した。今まで氷海水槽で主に行っていたものが、本装置の開発により実験の能率が著るしく向上した。

(3) 氷力と杭頭変位の経時変化とスペクトル密度から氷盤の破壊形態と杭構造物の動特性が歪速度に強く依存することが確認され、固有振動数が無限大で行った著者の一人、佐伯等の結果を裏づけた。

(4) 固有振動数の異なる三種類の模型で、最大水平氷力と歪速度の関係を調べた結果、過去に行れた固有振動数無限大の場合と同様に最大水平氷力は歪速度に依存し、歪速度が大きくなるにつれて氷力は小さくなること明らかとなった。また杭の固有振動数の違いは最大氷力には無関係であることが明らかとなった。

(5) 杭の最小・最大応答変位それに最大応答振幅は、

歪速度に強く依存し、歪速度が大きくなるにつれて、小さくなることが明らかとなった。また最大応答変位の方が最小応答変位よりはるかに大きいことも明らかとなった。これは高い応力レベルで振動していることを意味している。またP2とP3には有意な差は見られなかった。

(6) 氷力の変動から、P2、P3の卓越振動数は歪速度の増加とともに大きくなり、歪速度の小さな範囲では直線関係があることが明らかとなった。これは Sodhi 等の結果とも一致していた。

(7) P2とP3の杭頭変位の卓越振動数は、歪速度の増大とともに大きくなるが、それぞれの固有振動数に達すると、歪速度が増大してもそれ以上卓越振動数は大きくなり一定である。

(8) 柱状構造物の動特性に対する Matlock のモデルを修正した新しいモデルを実験結果に基づいて構築した。

(9) 動的応答倍率の実験結果と著者等のモデルで計算した結果は良い一致を示した。また、歪速度が  $0.2 \text{ sec}^{-1}$  を越えると1.0を越えることが明らかとなった。

(10) 最大・最小応答変位の実験結果と著者等と Matlock のモデルでの計算結果を比較した。著者らのモデルは、Matlock のモデルより実験値により一致することが明らかとなった。

## 参 考 文 献

- Bjork, B. (1981): Ice-Induced vibration of fixed offshore structures, Part 2, Experience with Baltic Lighthouse, Marine structures and ships in ice, Rep. No. 81-0612.
- Matlock, H., Dawkins, W. P. and Panak, J. J. (1969): A model for the prediction of ice-structure interaction, Proc. of 1st OTC, OTC 1066, Vol. 1, pp. 687~694.
- Peyton, H. R. (1968): Ice pressure against structures, NRC Tech. Memo., No. 92, pp. 117~123.
- Saeki, H., Tanaka, S. and Ono, T. (1984): The Distribution of ice pressure on offshore pile structure and the failure mechanics of ice sheet, proc. of 1984 OTC, No. 4685, Vol. 1, pp. 349~356.
- Saeki, H., Hamanaka, K. and Ozaki, A. (1977): Experimental Study on ice force on a pile, proc. of POAC, Vol. 1, pp. 695~706.
- Schwarz, J. (1970): The pressure of floating ice field on pile, proc. of IAHR ice symp. pp. 672~682.
- Sodhi, D. S. and Morris, C. E. (1986): Characteristic frequency of force variations in continuous crushing of sheet ice against rigid cylindrical structures, Cold Regions Science and Technology Vol. 12, pp. 1~12.
- Maattanen, M. (1983): Dynamic ice-structure interaction during continuous crushing, CRREL Rep. 83-5, pp. 53.