

氷と構造物の動的干渉に関する実験的研究

泉 山 耕*

1. 緒 言

東西間の冷戦の終結及びそれに伴う旧ソ連邦の解体により、北極海域に代表される寒冷海域を巡る政治・経済的環境が大きく変化しようとしている。我が国に近いところでは、サハリン沖の石油・天然ガスの開発が本格的に軌道に乗る兆しがある。また、ロシアの北極海沿岸を通りヨーロッパと極東地域を結ぶ、いわゆる北東航路の利用についても、活発に研究・調査が行われている。これらの動きは、単に資源開発、新航路の啓開といった直接的側面の他に、旧ソ連邦、特にロシアの経済的安定化に寄与するものとして関心を集めている。

さて、こういった寒冷海域における諸活動のためのインフラストラクチャーとして、各種海洋構造物は必要不可欠なものである。しかしながら、寒冷海域に建設される海洋構造物にとって、周囲の氷から受ける荷重、即ち氷荷重は非常に大きな脅威となる。この問題は、古くは灯台あるいは橋脚といった構造物についての研究に始まり、その後、1970年代から盛んとなった北極海域の天然資源開発の動向に呼応して、各種の形式の構造物と氷の干渉問題に関する本格的研究が開始され、これまでに数多くの研究成果が挙げられている。しかしながら、氷と構造物の干渉問題については、氷の破壊を伴う複雑な現象であること、信頼できる現地観測データの絶対量が不足していること等の問題があり、不十分な解明に留まっている点も多い。

これらの問題点の中で、現在最も関心を集めている問題の一つが、構造物の弾性的な変位あるいは振動等を伴う、氷と構造物の動的干渉の問題である。氷との干渉による構造物の振動は、既に1960年代にCook湾の構造物において計測されている(Blenkarn, 1970)。構造物の動的応答により、構造物の支持部には氷荷重に加えて構造物の慣性力による荷重が加わり、時には構造物全体の安定性を危ういものとする可能性もある。しかしながら、動的氷荷重は、細長く上部に比較的大きな質量を有する構造物、即ち、灯台あるいは橋脚等に特有の問題と考えられてきた。この考え方は、1986年、水線部が約100×100

mという海底油田開発用の巨大海洋構造物 Molikpaq において、振動に起因する強大な荷重が計測されたことから変更を余儀無くされた。この時、Molikpaqでは、ほぼ設計荷重に相当する荷重が計測されたばかりではなく、外荷重に対抗する最も主要な構造部であるケーソン内の中詰め砂に、振動による液状化現象が起きた可能性を示すデータも計測されている。以来、動的干渉問題は、新たな側面から注目を集めることとなった。

このような状況に鑑み、構造物と氷の動的干渉問題に関する基本的知見を得ることを目的として、氷海水槽における模型実験を試みた。本論文では、この模型実験の手法並びに結果について報告するとともに、構造物の動的応答及び動的干渉の機構について考察する。

2. 実 験

実験は National Research Council of Canada 所属の Institute for Engineering in the Canadian Environment (オタワ市)の氷海水槽において行われた。本水槽は、長さ21 m、幅7 m、水深1.2 mの水槽であり、強制対流方式の冷凍設備により水槽内温度を -20°C にまで冷却することができる。また、水槽両側壁上部に設置されたレール上を走行する台車(曳引台車)を有する。曳引台車の走行速度は1から650 mm/sの範囲で可変であり、最大50 kNまでの荷重を受けることができる。

本研究では、構造物模型を水槽内に張った氷の中に貫入させて、氷と構造物との干渉を実験的にシミュレートする、penetration test(貫入試験)を行った。具体的には、模型を曳引台車に取り付け、曳引台車を一定速度で走行させた。動的氷荷重に関する基本的知見を得るといふ研究の目的に鑑み、構造物模型としては幅167 mmの四角柱を用い、この一面に氷荷重が作用する状態で実験を行った。実験では、この荷重を受ける面を、鉛直、上向き並びに下向きに傾斜させた状態で試験を行ったが、本論文では荷重面を鉛直とした場合の結果について報告する。

実験装置の概要を図-1に示す。構造物の動的特性をシミュレートするために、剛性並びに固有振動周期等の動的特性を任意に調整できる compliance simulator を

* 正会員 工修 運輸省船舶技術研究所主任研究官

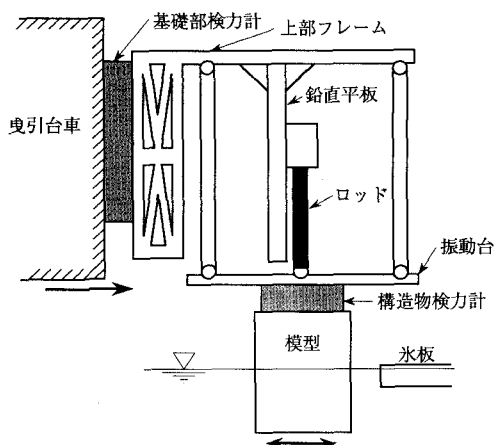


図-1 Compliance Simulator

用いた。Compliance simulator は、上部フレームとその下部に取り付けられる振動台から成る。両者は両端にユニバーサルジョイントを有する四本のロッドで連結される。この構造により振動台は、上部フレームに対する水平面内の運動の自由度を持つ。上部フレームには、また、鉛直平板が溶接されている。振動台はこの平板と二本の鋼製ロッドで連結されるが、ロッドの取付は、平板に対しては固定端、振動台に対しては回転端となっている。この結果、ロッドは片持ち梁として機能し、ロッドの直径、平板上のロッドの固定位置を変化させることにより、振動台の上部フレームに対する剛性を調整することができる。また、二本のロッド間の距離を変えることにより、振動台の回転剛性の調整も可能となる。また、振動台上にウェイトを置き、模型等を含めた振動台以下の部分の質量を調整することにより振動台の固有周期を調整することができる。本実験では、模型を橋脚の1/30程度の模型と考え、振動台の剛性並びに固有周期を301.2 kN/m及び5.86 Hzとして実験に供した。

模型は検力計を介して振動台の下部に取り付け、compliance simulator はさらにもう一台の検力計を介して曳引台車の前面に取り付けた。以下、簡単のため、前者を構造物検力計、後者を基礎部検力計と記することにする。検力計は両者とも、6分力の検出が可能であるが、本論文では、最も基本的な量である、模型の貫入方向に平行な力の成分に注目して議論を進める。これらの力の他に、模型の動的応答の計測も行った。模型の貫入方向に二台、これと直角方向に一台の合計3台の変位計を用い、曳引台車に対する模型の変位を計測した。また、変位に加えて、模型の加速度の計測も行った。これらの計測結果についても、力同様、模型の貫入方向に平行な成分について、以下議論を進める。

氷海水槽における各種模型試験に使用される氷は、模

型の縮率に応じて厚さ並びに機械的諸特性を調整した、いわゆる「模型氷」である。言うまでもなく、模型氷の特性は実験結果に大きな影響を与える。このため、氷中模型試験の歴史は、模型氷開発の歴史といっても過言ではなく、これまでに様々な模型氷が提案されている。本研究において用いた模型氷は、プロピレングリコールの水溶液を凍結させた氷であり、その製氷過程では、結晶構造の微細化のための wet seeding、強度調整のための tempering 等の手法が採られている。これら模型氷について、その詳細を述べることは本論の目的ではないので、差し控えることとする。模型氷の種類並びにその諸特性調整の手法については、他の文献を参照されたい(例えば、Schwartz, 1977; Timco, 1981)。

試験の手順は以下のとおりである。まず、模型氷の圧縮並びに曲げ強度の計測を行う。圧縮強度は氷サンプルの一軸圧縮試験により計測し、曲げ強度は氷板内に切り出した片持ち梁の曲げ試験により計測した。今回の実験では、圧縮強度 100 kPa を中心に、30 から 130 kPa の圧縮強度の氷に対して実験を行った。この後、模型の進行方向と直角に氷縁を切り出し、模型前面からこの氷縁までの氷を排除する。これは、模型と氷の初期接触の条件を整えるためである。この作業による水面の擾乱が治まった後に模型の氷板への貫入試験を行う。試験後、模型の貫入跡に沿って氷厚の計測を行い、その平均値をもって試験に対する氷厚値とした。今回の実験では、25 から 40 mm の氷厚の氷に対して実験を行った。一枚の氷板に対し3から5回の貫入試験を行った。一回あたりの模型の走行距離は2.5から3m程度となるが、模型の幅、氷板の厚さ及び破壊形態を勘案すると、これは充分な距離と言えよう。12枚の氷板に対し、合計53ケースの実験を行った。氷と構造物の干渉に影響する因子は数多いが、今回の実験では、特に干渉速度の影響について注目し、15から500 mm/s という広範な速度範囲についての実験を行った。比較検討の対象とするため、一部の試験については振動台の動きを拘束して貫入試験を行った。

3. 考 察

3.1 氷荷重の推定

今回の実験では、基礎部検力計及び構造物検力計の2台の検力計を用いて力の計測を行っている。これら2台の検力計により計測される力、それぞれ、 F_S 及び F_F 、氷その他から構造物が受ける外力 F_E 及び系の加速運動に伴う慣性力の関係は図-2で与えられよう。同図より、構造物への外力 F_E は次の式で与えられる。

$$F_E = F_F - (M_1 + M_2)\ddot{x}_R \dots\dots\dots (1)$$

$$F_E = F_S - M_2\ddot{x}_R \dots\dots\dots (2)$$

ここに M_1 及び M_2 はそれぞれ、振動台及び構造物模型の

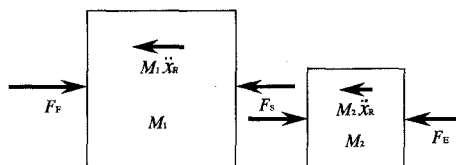


図-2 系に働く力

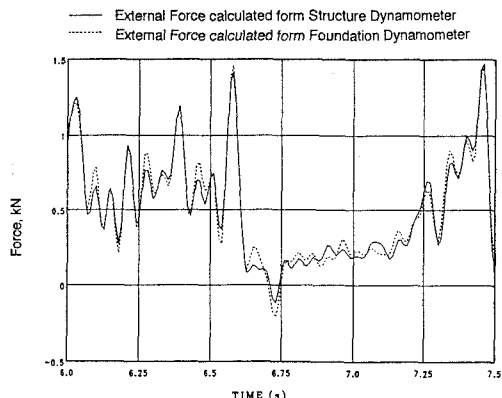


図-3 外力の計算結果

実効質量, x_R 及び \dot{x}_R は構造物の曳引台車に対する相対変位及びその二次時間微係数, 即ち加速度である. M_1 及び M_2 は, 系の自由振動試験より推定が可能である. したがって, 検力計並びに加速度計の計測結果より, 模型に働く外力の推定が可能となる. 式 (1) および (2) より外力を計算した結果の一例を図-3 に示す. 同図より両計算結果が互いに非常に良く一致することが判る.

式 (1) および (2) により与えられる外力には, 氷から構造物を受ける氷荷重の外に, 流体抵抗及び振動に対する流体力学的減衰さらに compliance simulator の構造的減衰の影響が含まれる. しかしながら, これらの諸成分のうち氷荷重が卓越的であり, 実質的には上2式で与えられる外力を氷荷重と考えることができる. 以下の解析にあたっては, 構造物検力計の計測結果より計算される外力をもって氷荷重と呼ぶこととする.

3.2 模型の動的応答

Karna ら (1989) は, 氷と構造物の動的干渉問題に関する数値計算を試みた. 彼らの計算結果は, ポスニア湾の航路標識用構造物における計測結果と良い一致を示した. この数値計算手法を用いて, 彼らは構造物の動的応答に対する氷板の移動速度の影響についてのシミュレーションを行い, ある速度領域では構造物の変位速度の最大値が氷板の移動速度に従って増加することを示した. 彼らはこの現象についてさらにエネルギー収支の観点から考察を行い, 構造物の変位速度の最大値 U と氷板の移動速度 V との間に次の関係を得た (Karna ら, 1990).

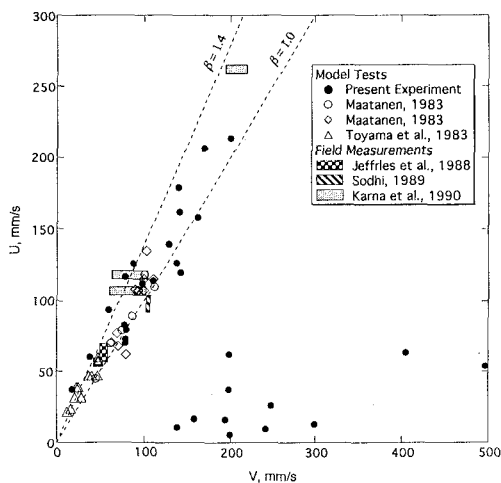


図-4 構造物の最大応答速度と氷板移動速度との関係

$$U = \beta V \dots\dots\dots (3)$$

ここに β は 1 より僅かに大きな係数である.

図-4 に, 今回の実験結果を含め, 模型並びに現地実験を含む各種の計測結果より得られた, 構造物の変位速度の最大値と氷板の移動速度との関係を示す. なお, 模型試験では, 今回の実験のように, 静止している氷板に模型を貫入させる手法氷と構造物の干渉現象をシミュレートする機会が多いが, この場合, 実現象との対応では, 模型の貫入速度, 即ち, 曳引台車の走行速度が氷板の移動速度に, 曳引台車と模型との相対速度が構造物の変位速度に相当する. 以下, 混乱を避けるため, 実構造物の場合, 即ち模型試験の場合は曳引台車を基準とした相対運動, に即した表現を用いて文章を進めることとする. 図より, 氷板の移動速度の増加に伴い, 構造物の応答速度の最大値が線形的に増加していることが判る. 図中の破線は, 式 (3) において $\beta=1.0$ 及び 1.4 とした結果である. Karna ら (1990) は, $\beta=1.4$ を設計基準として提案しているが, 図より, この関係は構造物の変位速度の最大値の上限程度を与えることが判る.

Karna ら (1989) の計算結果は, また, 構造物の運動は氷板移動速度のある値において, 共振状態から非共振状態へ急激に遷移することを示した. この遷移速度は, 構造物の設計という観点からは重要な因子である. 今回の実験結果からもこの傾向はうかがえる. しかしながら, 図-4 ではこの遷移速度は 130 から 200 mm/s の間であり, 明瞭ではない. Karna ら (1989) は, この共振から非共振状態への遷移速度について, 氷荷重のレベルの影響を示唆している. 今回の実験では, 供試模型は一定であるが, 氷板の氷厚並びに強度値にはある程度の幅があり, これが遷移速度に影響したのと考えられる. この

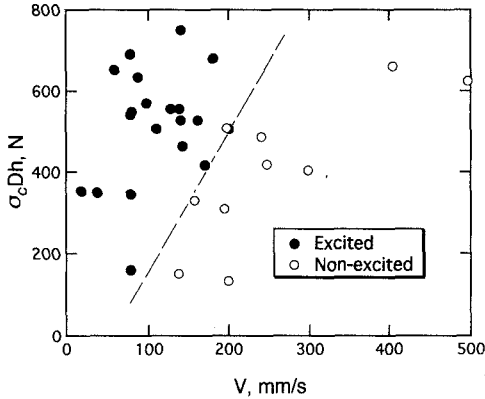


図-5 共振-非共振間の遷移

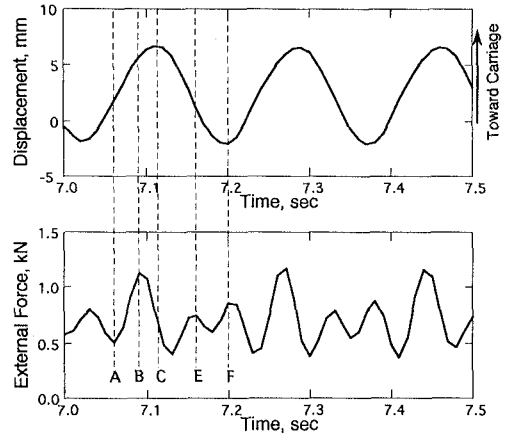


図-6 模型変位と氷荷重の0.5秒間の波形

ため、次式により氷荷重 F_c のレベルを評価し、これと遷移速度との関係を調べた。

$$F_c = \sigma_c D h \dots\dots\dots (4)$$

ここに σ_c 並びに h は氷の圧縮強度並びに厚さであり、 D は模型幅である。曳引台車速度と氷荷重のレベルをパラメーターとして共振、非共振状態をプロットした結果が図-5である。図より、氷荷重のレベルが低いほど遷移速度が低くなることが判る。

3.3 模型の動的応答の氷荷重に対する影響

図-6は、典型的な共振状態が発生した場合の模型の変位と氷荷重の0.5秒間の波形を示した図である。図より、模型は非常に整った正弦波状の周期運動をしていることが判る。これに対し、氷荷重は全く異なった挙動を示している。しかしながら、氷荷重の挙動もまた周期的であり、その変動は模型の変位と強い相関がある。氷荷重には高い一つのピークと比較的低い二つのピークが周期的に現われ、高いピークは模型の変位が最大となる直前に、低い二つのピークは模型が氷の方へ運動する過程で現われる。

構造物による氷の破壊現象、特に crushing は、複雑な現象であり、今後の解明を待たなければならない部分が多々あるが、Timcoら(1987)は氷の crushing 現象について、氷の破碎(pulverization)と破碎された氷の破碎層からの排除(extrusion)からなるプロセスであるとのモデルを提案している。図-6に見られる氷荷重のピークが氷の破碎に伴うものと考え、模型の運動との関係から、図-6に示された干渉過程について図-7のような説明ができよう。即ち、時刻Aにおいて模型は氷板とほぼ同様の速度で運動し、この時式(3)に示される最大変位速度に達する。図-4に見られるように、この速度は氷板の移動速度を僅かに上回るものとなるが、氷と模型との接触は保たれ、ある程度の力が伝達される。これは、この過程が氷の弾性変形の回復を伴う過程であると考え

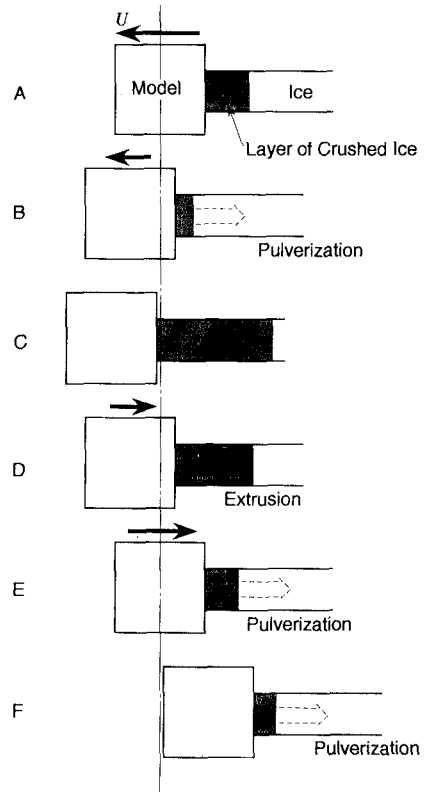


図-7 模型と氷の干渉機構

ると説明がつく。この後、模型の変位速度は徐々に減少し、これと共に氷内部の応力が高まり、時刻Bにおいて破碎に至る。氷の破碎後も模型はその運動量により曳引台車方向にさらに運動を続け、時刻Cで反転する。反転後模型は、破碎層内部の氷を排除しながら氷方向へ運動する。氷の破碎層の幅が短縮されるにつれ氷内部の応力

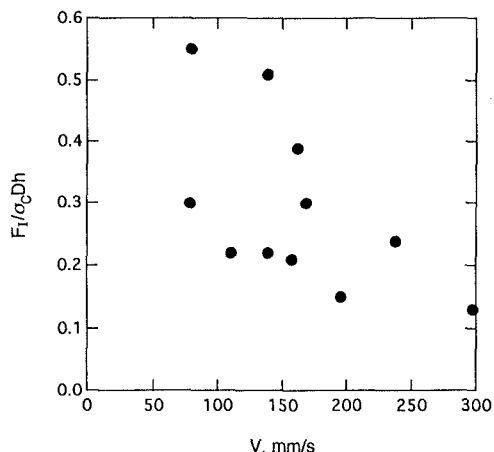


図-8 氷荷重の干渉速度依存性

が再び高まり、時刻 E において第二回目の破砕の発生となる。模型の全運動エネルギーはこの破砕では費やされず、模型は氷方向の運動を続け第三回目の破砕を引き起こす。

図-6 に示された氷荷重の挙動について興味深い点は、一周期中の各破砕に対応する氷荷重値が異なる点である。即ち、時刻 B における氷荷重が最大であり、時刻 E 及び F における氷荷重はその値が低い。この傾向は氷荷重の荷重速度依存性により説明がつこう。図-8 に、振動台の変位を拘束した場合の模型について、その初生荷重（構造物と氷との初期接触時に発生する氷荷重） F_1 と干渉速度との関係を示す。図より、干渉速度の増大に伴って初生荷重が減少する傾向が見られる。図-6 に示されたケースについて考えると、時刻 B における模型と氷板との相対速度は非常に低く、これに対し、時刻 E 及び F におけるそれは、それぞれ、 $2V$ 及び V 程度となろう。従って、図-8 に示された氷荷重の荷重速度依存性と干渉過程の各時点における干渉速度の差により、図-6 に見られる氷荷重の挙動を説明することができよう。

上記の考察では、荷重速度という観点から、実験で計測された氷荷重の挙動を説明した。近年 Karna (1994) は、ある干渉速度（critical velocity）において氷の強度が急激に変化するというモデルを用いて数値計算を行った。このモデルにより彼らは、構造物が動的に応答することにより、構造物前面の氷の破壊挙動が非同時なものから同時なものへと変化することをシミュレートすることに成功した。これは Molikpaq における動的干渉の際

に観測された、いわゆる“phase lock motion”を説明する可能性のあるものであり、非常に興味深い結果である。しかしながら、現段階では critical velocity の具体的な値、特に実海水に対する値については明確な指針はなく、本モデルが実際の設計に応用されるにはまださらなる研究が必要である。

4. 結 言

本論文では、氷と構造物の動的干渉問題に関する模型試験について、実験の手法並びに結果を報告すると共に、実験結果と過去の試験結果及び理論との比較を行った。また、模型と氷の動的干渉過程に関して、そのメカニズムの説明を試みた。本論文は今回の実験に対する第一報的な報告である。今後さらにデータの細部についての解析を進めるとともに数値計算手法も取り入れ、氷と構造物の動的干渉問題に対する理解を深める一助としたい。

謝辞：本論文は、著者が科学技術庁の長期在外研究員として National Research Council に滞在中に行った実験結果の一部をまとめたものである。この海外留学の機会を与えていただいた、船舶技術研究所、運輸省並びに科学技術庁の関係者の方々に、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Blenkarn, K. A. (1970): Measurement and analysis of ice forces on Cook Inlet structures, Proc. of Offshore Technology Conference, OTC 1261.
- Karna, T. and R., Turunen (1989): Dynamic response of narrow structures to ice loading, Cold Regions and Technology, Vol. 17, pp. 173-187.
- Karna, T. and R., Turunen (1990): A straightforward technique for analysing structural response to dynamic ice action, Proc. of the 9th International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 4, pp. 135-142.
- Karna, T. (1994): Mitigation of steady-state vibrations induced by ice, Proc. of 4th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 2, pp. 534-539.
- Schwarz, J. (1977): New developments in modeling ice problems, Proc. 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, pp. 45-59.
- Timco, G. W. (1981): Flexural strength of ice grown from chemically impure melts, Cold Regions Science and Technology, Vol. 4, pp. 81-92.
- Timco, G. W. and I. J., Jordaan (1987): Time series variations in ice crushing, Proc. of the 9th International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 1, pp. 13-20.