

大断面直立海洋構造物に作用する氷力に関する研究

竹内 貴弘*・佐伯 浩**・岡本 智***・山下 俊彦****

1. 序 論

北極海及びオホーツク海北部海域に建設される大型海洋構造物の支配外力は、氷盤移動時の氷力となる場合が多い。氷力は、風・波・流れによって移動した氷盤が構造物と接触部分で破壊するのに必要な力である。このため、現地及び室内氷盤貫入試験により、氷盤の破壊様式の観察や氷盤の強度試験とともに氷力が評価されてきた。この場合、①氷厚が一定である、②氷盤と構造物は一樣に接触した状態（理想的な接触条件）で相互作用を開始する、③構造物前面の氷盤は同時に破壊する、④氷盤を移動させる driving force の大きさに制限はない、との仮定があった。これらの仮定下の氷力は、実海域での氷力と比較すると、特に、構造物が大型な場合、過大傾向を示す可能性がある。それは、実海域での氷盤と構造物の相互作用は、図-1 に示されている様にこれらの仮定が必ずしも成立しないためである。Weeks et al. (1971) や Kovacs (1983) の実海域の氷厚測定結果では、pressure ridge・多年氷・open lead の存在から氷厚は非一様となっている。Hallam et al. (1987) や竹内・シャピロ (1991 a, 1991 b) は、氷厚が非一様な場合、その最小部において氷盤は破壊する可能性があるために、実海域の氷力は低減されることを示した。次に、Croasdale et al. (1987), Vivatrat and Kreider (1981) は、ridge-building 効果、風や流れによる効果、open lead や tidal クラックの存在が氷盤の移動に与える影響を調べ、現地観測との比較から driving force の大きさには制限があり、氷盤の破壊荷重よりも小さくなる可能性があることを示した。氷盤の非同時破壊に関しては、Kry (1978), Ashby et al. (1986) が氷力の計算モデルを提案している。Sanderson (1988) は、氷盤の形状は水平面方向においても不規則であり、氷盤の leading edge は構造物と一樣には接触しないことを指摘している。著者らのオホーツク海の現地観測においても、氷盤

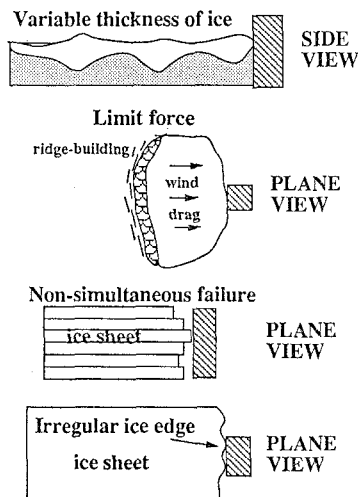


図-1 実海域における氷盤と構造物の相互作用（斜線部分は、構造物を示す。）

の leading edge の形状は非常に不規則であることを確認している。竹内ら (1991 c) は、アスペクト比（構造物/氷厚）が 2.5~7.5 の条件下で、氷盤 edge 部の各種形状を考慮した場合の氷力は、理想的な接触条件下の氷力の約 80% になることを実験的に示している。

本研究では、アスペクト比（構造物/氷厚）の大きい大断面直立構造物に作用する氷力を評価することを目的として、氷盤 edge 部の各種形状が氷力に与える効果をフィールド氷盤貫入試験により調べたのでこれらの結果について報告する。

2. 実験法と実験装置

全ての試験は、北海道の白鳥湖で行った。現地の氷は、淡水氷で氷厚が約 30 cm 以上に達しており、また、結氷中に積雪の影響を受けた雪氷で層状をなしていた。このため、図-2 に示したように現地氷盤に穴を開け、(1.8×3.2 m)、新たに良質の氷盤を作成した。結氷中は、氷盤上を完全に除雪した。氷盤 edge 部の形状が構造物に作用する氷力に与える効果を調べるために、アスペクト比 (2.5~7.5) が小さい試験結果を参考に、図-3 に示されている 3 通りの氷盤形状で試験を行った。この場

* 工修 MS. 清水建設(株) 技術研究所海洋環境G研究員

** 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

*** 北海道大学大学院 工学研究科

**** 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

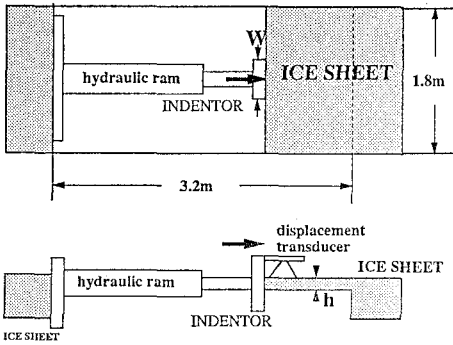


図-2 現地氷盤貫入試験概要

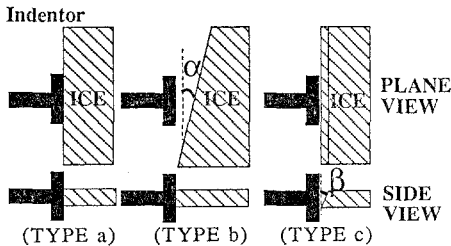


図-3 氷盤と構造物の初期の接触条件

合、氷厚は一定とした。試験条件を、表-1 に示す。貫入杭の幅 (W) は、1.0m である。貫入速度 (V) は、氷盤の貫入に伴う歪速度が、最大氷力を与える 10^{-8} sec^{-1} のオーダーとなる速度であった。歪速度 (de/dt) は、Michel の提案式で計算した。アスペクト比 (W/h) は、11.4~15.4 である。氷の強度は氷温に強く影響されるために、一連の実験は各々が比較可能となるように日程を調節して行った。この場合、CASE 1~CASE 4, CASE 5~CASE 7 の氷の強度は一定となるよう配慮した。試験装置は、氷上移動及び、所定位置に油圧ジャッキと貫入杭が納まるように上下方向のコントロールが可能となるように設計した。全氷力は、油圧ジャッキ内の圧力を圧力センサーで測定し、圧力に油圧断面積を乗じて算定した。貫入速度 (V) は、杭先端に標準変位計を取り付けて変位の時間変化から計算した。局部氷圧力の時間変

表-1 実験条件

CASE	h (cm)	V (cm/sec)	de/dt (sec^{-1})	氷盤形状 (deg.)
1	7.0	1.348	0.0034	$\alpha = \beta = 0$
2	6.5	1.076	0.0027	$\alpha = 5.09$
3	6.5	1.084	0.0027	$\alpha = 9.82$
4	6.5	1.111	0.0028	$\alpha = 29.68$
5	8.8	1.158	0.0029	$\beta = 6.27$
6	8.8	1.158	0.0029	$\beta = 13.42$
7	8.8	1.158	0.0029	$\alpha = \beta = 0$

化も、杭前面に取り付けた圧力センサーから測定した。圧力センサーを取り付けたパネルは、ステンレス製で、充分な剛性を有している。

3. 実験結果

3.1 氷盤の破壊形態

図-4 に、3 種類の氷盤形状に対する氷盤の破壊形態を示す。TYPE a の場合 (CASE 1) は、インデンターの貫入に伴い前面の氷盤は貫入幅と同じ大きさで上下方向にせん断破壊した。その後、氷盤前面の各領域において非同時的に破壊を繰り返しながら構造物へ断続的な氷力を伝達した。試験後の氷盤は、図に示されたように flaking を受けた部分が削り取られた状態になる。その後、インデンターとの接触は非一様な状態となり、非同時的破壊の原因となる。アスペクト比の小さい過去の試験結果と同様な破壊形態になった。TYPE b の場合 (CASE 3) は、インデンターの貫入によって、前面の氷盤は横方向に排除される破壊形態となった。インデンターが氷盤へ完全に貫入する以前に、氷盤は既に破壊していた。TYPE c の場合 (CASE 6) は、インデンター前面の氷盤は、初めに圧縮された状態で破壊し、その後氷が下から上に排除される状態で破壊が進行した。この場合も氷盤がインデンターに完全に貫入する以前に既に破壊が発生していた。TYPE b, c においてインデンターが氷盤に完全に貫入した後は、TYPE a の初期氷力後の破壊と同様に振動を伴った非同時的な氷盤の破壊となった。

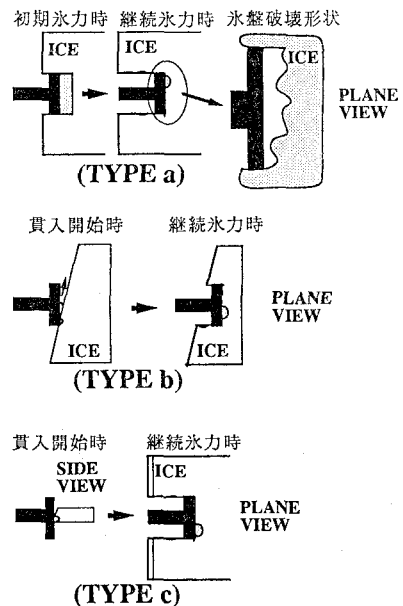


図-4 氷盤の破壊形態

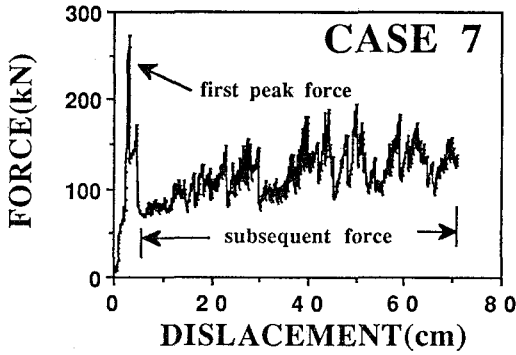


図-5 氷盤貫入試験時の全氷力の測定結果 (CASE 7)

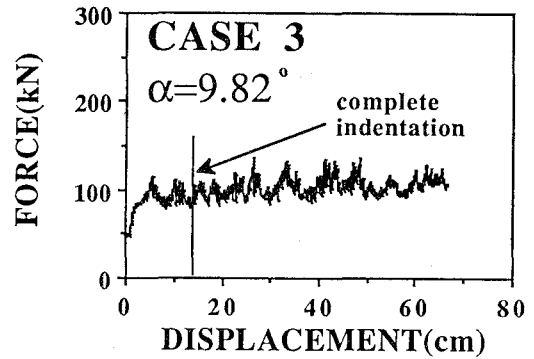


図-6 氷盤貫入試験時の全氷力の測定結果 (CASE 3)

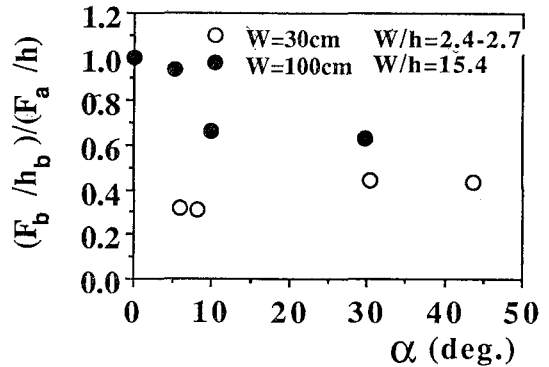
表-2 実験結果

CASE	F (kN)	F' (kN)	T _b (sec)	L _b (cm)	W _f (cm)	h _f (cm)
1	222.9	170.0	3.48	4.69	100	7.0
2	-----	190.9	5.55	5.97	52.7	6.5
3	-----	136.9	5.16	5.59	27.1	6.5
4	-----	131.0	4.20	4.67	8.2	6.5
5	273.8	239.6	1.65	1.91	100	8.8
6	-----	237.6	1.26	1.46	100	6.7
7	272.1	194.9	1.38	1.60	100	8.8

3.1 全氷力

TYPE a の場合、氷盤貫入試験時の全氷力の測定結果を図-5 (CASE 7) に示す。全氷力は最大値である初期氷力 (F) に到達した後、一旦減少し微小な変動をともなったば一定値の継続氷力となり、この時氷盤は continuous crushing の非同時的な破壊をする。継続氷力の最大値を (F') とすると、(F'/F) の値は、0.76 (CASE 1), 0.72 (CASE 7) となり Nakazawa and Sodhi (1990) らの報告 ($W/h=0.8\sim 3.0$), 及びアスペクト比が小さい時の結果に一致する (表-2 参照)。また、本研究では、氷の一軸圧縮強度は Saeki 式 (1980, 1986) から評価した。この場合、(CASE 1~CASE 4) では 4.88 (MPa), (CASE 5~CASE 7) では 4.74 (MPa) であり、過去の研究結果に一致する。よって、理想的な接触条件時の全氷力は、Saeki 式で評価できる。

TYPE b の場合、インデンターの貫入量に対する全氷力の測定結果を図-6 (CASE 3) に示す。図-5 と図-6 の比較から明らかなように、氷盤 edge 部の形状が一樣でない場合、初期氷力は全氷力の最大値とはならず、見かけ上、継続氷力のみが作用する状態となる。同様に、 $\alpha=5.09$ (deg.), $\alpha=29.68$ (deg.) の両場合においても、初期氷力は継続氷力を越えない。これらの場合の全氷力の最大値を (F_b) とし、TYPE a の時の全氷力を ($F_a=F$) で表しこれらの比をとり、氷厚を補正すると図-7 の様になる。この図において、横軸の α が増加する

図-7 $(F_b/h_b)/(F_a/h)$ と α の関係

にともない $(F_b/h_b)/(F_a/h)$ の値は減少し、一定値に近づくことが分かる。この傾向は、アスペクト比の小さい過去の実験結果 ($W/h=2.4\sim 2.7$) と同様な傾向となるが、アスペクト比が大きい程、 $(F_b/h_b)/(F_a/h)$ の値は大きくなった。また、この条件下 ($W/h=2.4\sim 2.7$) では、 α が約 8 (deg.) 以下では顕著な初期氷力は発生した。

TYPE c の場合、インデンターの貫入量に対する全氷力の測定結果を図-8 (CASE 6) に示す。TYPE b の場合と同様に、初期氷力は全氷力の最大値とはならず、

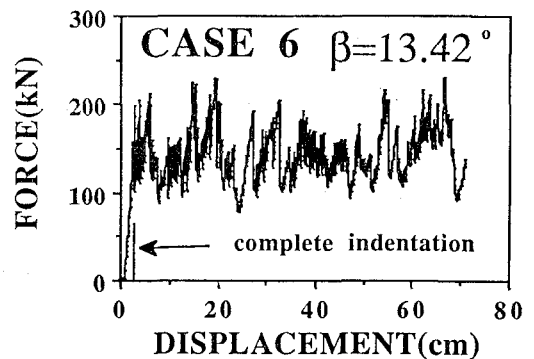
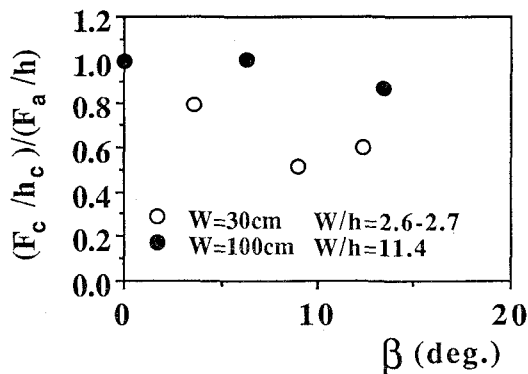
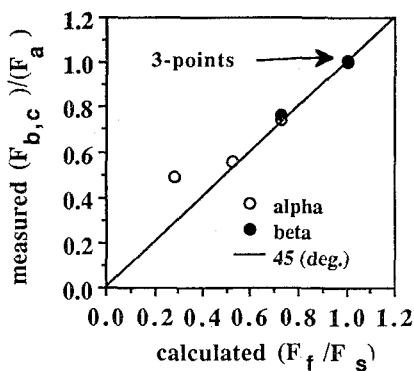


図-8 氷盤貫入試験時の全氷力の測定結果 (CASE 6)

図-9 $(F_c/h_c)/(F_a/h)$ と β の関係図-10 実測値 $(F_{b,c}/F_a)$ と予測値 (F_f/F_s) の関係

見かけ上、継続氷力のみが作用する状態となった。しかし、 $\beta=6.27$ (deg.) の場合においては、初期氷力が顕著になり、継続氷力より大きい。これらの場合の全氷力の最大値を (F_c) とし、 $(F_c/h_c)/(F_a/h)$ を計算すると図-9 の様になる。この図において、横軸の β が増加するにともない $(F_c/h_c)/(F_a/h)$ の値は減少する傾向を示す。これらの関係は、アスペクト比の小さい過去の実験結果 ($W/h=2.6\sim 2.7$) と同様な傾向となるが、アスペクト比が大きい場合程、 $(F_c/h_c)/(F_a/h)$ の値は大きくなった。また、この条件下 ($W/h=2.6\sim 2.7$) では、 β が約 12 (deg.) 以下では顕著な初期氷力は発生した。

3.3 貫入開始から初期氷力発生までの貫入量

貫入開始から初期氷力が発生するまでの経過時間 (T_b) 、貫入量を (L_b) とする。表-2 に示された結果通り、氷厚が大きくなるにつれて (L_b) の値は小さくなる。この結果は、過去の佐伯ら (1984) の海水を用いた実験結果に一致する。すなわち、氷盤 edge 部の凸部が (L_b) より大きい場合には、氷盤は凸部分において局部的に破壊することを示している。この (L_b) の値は、 (W) 、 (h) 、氷の圧縮強度に依存する可能性があるために、その量的評価は今後のデータに期待せざるを得ない。しかし、本実験結果では、氷厚が 6.5 cm の時 6.0 cm 以下、氷厚が 8.8 cm の時 2.0 cm 以下となり、氷厚が一定の時 α 、 β の値に影響されず、ほぼ同じ貫入量で氷盤は破壊した。

次に、インデンターが (L_b) 貫入した状態における氷盤とインデンターとの接触有効幅を (W_f) 、接触有効氷厚を (h_f) とする。ここで、(CASE 1~4) に対しては $L_b=4.69$ cm、(CASE 5~7) に対しては $L_b=1.60$ cm を基準 ($\alpha=\beta=0$ (deg.)) として用いる。この時の全氷力を Saeki 式から評価し、 (F_f) とする。また、 (W) 、 (h) 時の全氷力を同様に Saeki 式から計算して (F_s) とし、これらの比 $(F_f)/(F_s)$ と実測値 $(F_{b,c}/F_a)$ と比較した結果が図-10 となる。図中のプロットは、直線に近く、

実測値と計算値はほぼ一致する。このことは、基準 ($\alpha=\beta=0$ (deg.)) 時の (L_b) の値と氷盤 edge 部の形状が与えられると、全氷力は予測可能になることを示している。

4. 結 論

①理想的な接触条件 (TYPE a) においては、アスペクト比の大小にかかわらず初期氷力 (F_a) は佐伯式から評価した値とよく一致した。また、初期氷力が発生した後の継続氷力は、変動をともなったほぼ一定値を示し、かつ初期氷力の約 76% 以下で、アスペクト比の小さい領域 ($W/h=0.8\sim 3.0$) での Nakazawa and Sodhi (1990) らの結果と一致する。② (TYPE b) の氷力 (F_b) は、($W/h=15.4$) の条件下では、角度 α の増加にともない減少し、角度 α が約 10 (deg.) を越えると (F_a) の 0.7 倍を越えない一定値に近づく。これに対して、($W/h=2.4\sim 2.7$) の条件下の過去の実験結果では、氷力 (F_b) は角度 α の増加にともない減少し、角度 α が約 5 (deg.) を越えると (F_a) の倍 0.5 となった。③ (TYPE c) の氷力 (F_c) は、($W/h=11.4$) の条件下では、傾斜角度 β が増加するとともにだらかに減少し、 $\beta=13$ (deg.) 程度で (F_a) の 90% 程度となる。これに対して、($W/h=2.6\sim 2.7$) の条件下の過去の実験結果では、氷力 (F_c) は角度 β の増加にともない減少し、角度 β が約 10 (deg.) を越えると (F_a) の約 0.5 倍となった。すなわち、 α 、 β が変化する両方の条件において、アスペクト比の大きい場合は、小さい場合に比べて氷力低減に寄与する氷盤の形状不規則効果は小さかった。④ $W/h=11.4\sim 15.4$ では、 α が約 5 (deg.)、 β が約 13 (deg.) を越えると、顕著な初期氷力は発生せずに継続氷力のみが作用する。これに対して、 $W/h=2.4\sim 2.7$ では、 α が約 8 (deg.)、 β が約 12 (deg.) 以下の時、顕著な初期氷力は発生した。⑤理想条件下で、初期氷力が発生するのに必要な杭の氷盤への貫入量は、氷厚が大きくなるに従い小さくなるという傾向が現れた。この事実は、氷厚

が大きい海域では、氷盤 edge 部の僅かな形状不規則性により局部的に破壊が発生することを示唆している。また、理想条件下で氷厚が一定の時、初期氷力が発生するのに必要な杭の氷盤への貫入量は、 α , β が変化する場合の貫入量とほぼ同じ値になった。⑨以上より、想定海域の氷盤形状及び構造物のアスペクト比が与えられると、構造物に作用する全氷力は従来の氷力より小さい値で評価できる。また、今後は、初期氷力が発生するまでの貫入量と氷厚・アスペクト比・氷の強度の関係を調べることで、氷盤 edge 部の形状が不規則な時の氷力も算定可能となる。

参 考 文 献

- Ashby, M. F., A. C. Palmer, M. Thouless, D. J. Goodman, M. W. Howard, S. D. Hallam, S. A. F. Murrell, T. J. O. Sanderson and A. R. S. Ponter (1986): Nonsimultaneous failure and ice loads on arctic structure, Proc. OTC, pp. 399-404.
- Croasdale, K. R., G. Comfort, R. Frederking, B. W. Graham and E. L. Lewis (1987): A pilot experiment to measure arctic pack-ice driving forces, Proc. 9th POAC pp. 381-395.
- Hallam, S. D., N. Jones and M. W. Howard (1987): The effect of subsurface irregularities on the strength of multiyear ice, Proc. 6th OMAE, Vol. 4, pp. 235-238.
- Kovacs, A. (1983): Characteristics of multiyear pressure ridges, Proc. 7th POAC Vol. 3, pp. 173-182.
- Kry, P. R. (1978): A statistical prediction of effective ice crushing stresses on wide structures, Proc. IAHR, part pp. 33-47.
- Nakazawa, N. and S. Sodhi (1990): Ice forces on flat, vertical indentors pushed through floating ice sheets, CRREL Special Report 90-14, 62 p.
- Saeki, H. and A. Ozaki (1980): Ice forces on piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. Per Tryde, Springer-Berlag, pp. 342-350.
- Saeki, H., S. Tanaka and T. Ono (1984): The distribution of ice pressure on offshore pile structure and the failure mechanics of ice sheet, Proc. OTC, pp. 349-356.
- Saeki, H., T. Ono, T. Takeuchi, E. L. Suenaga and M. Sakai (1986): Total ice forces on the clusters of cylindrical pile, Proc. 5th OMAE, pp. 461-466.
- Sanderson, T. J. O. (1988): ICE MECHANICS-risks to offshore structures, Graham & Trotman, 253 p.
- 竹内貴弘・ルイス・シャビロ (1991a): 多年氷の変形様式と応力伝達について, 海洋開発論文集, Vol. 7, pp. 201-206.
- 竹内貴弘・ルイス・シャビロ (1991b): 北極海の実氷を用いた海水の強度に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第38巻 (2), pp. 686-690.
- 竹内貴弘・岡本 智・折谷徳弘・山下俊彦・佐伯 浩 (1991c): 矩形断面の直立構造物に作用する氷力に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻 (2), pp. 696-700.
- Vivাত্র, V. and J. R. Kreider (1981): Ice force prediction using a limit driving force approach, Proc. OTC, pp. 471-485.
- Weeks, W. F., A. Kovacs and W. D. Hibler (1971): Pressure ridge characteristics in the Arctic coastal environment, Proc. 1st POAC, pp. 152-183.