

矩形断面構造物の貫入時における氷盤の 非同時的破壊特性に関する研究

竹内 貴弘* 岡本 智** 秋原 真哉*** 佐伯 浩****

1. 緒 言

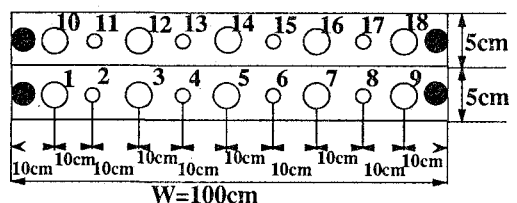
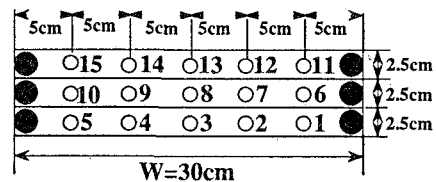
氷海域に構造物を建設する場合、氷盤の破壊に起因して構造物に伝達される氷力の評価が必要不可欠となる。一般に、構造物が小さい場合の氷力は、氷盤の移動に伴って構造物前面の氷盤が同時に破壊した時に最大値（初期氷力）を示し、その後、初期氷力を越えない継続氷力を示す。よって、設計氷力は初期氷力に基づき評価されてきた。これに対して、大型構造物が氷盤と相互作用する場合、構造物前面の氷盤の破壊は非同時的破壊及び構造物と氷盤の不規則接触によって特徴付けられる（Kry, 1978）。従って、小規模試験に基づく氷力評価をそのまま大型構造物に適用した場合、氷力は過大傾向を示す。Sanderson (1988) は、氷の室内強度試験・フィールド氷盤貫入試験・砕氷船の抵抗計測・実構造物及び実島と氷盤の相互作用時の氷力算定から得られたデータを基に、構造物と氷盤の接触面積が増大すると貫入氷圧力は減少することを示す pressure-area curve を報告した。Kry (1978) は、構造物前面の氷盤が独立の領域において非同時的に圧縮破壊するというコンセプトに基づき、各独立破壊領域の氷力が対数正規分布に従うとの仮定を用いて、各領域数が増加するにつれて平均氷圧力は減少することを示すモデルを提案した。Ashby et al. (1986) は、独立破壊領域において氷盤が立方体形状に破壊すると仮定し、二項分布を用いて、平均氷圧力の極値が構造物と氷盤の接触面積が増大すると減少することを示すモデルを提案した。しかし、これらのモデルを用いて非同時的破壊時の氷力を計算する場合、各独立破壊領域の大きさの決定が必要不可欠である。本研究は、淡水湖水を用いたフィールド氷盤貫入試験により、継続氷力時の非同時的破壊特性を調べ、各独立破壊領域の大きさ及び氷力特性を評価したのでこれらの結果を報告する。

2. 実験内容と実験条件

現地氷盤貫入試験は、北海道の篠津湖及び白鳥湖で行った。現地の氷は、両湖とも淡水氷である。試験に用いた氷盤は、現地氷盤に穴を開け、新たに結氷させた良質の氷盤である。

貫入杭の幅（ W ）は、篠津湖の場合（0.3 m）、白鳥湖の場合（1.0 m）とした。貫入速度（ V ）は、篠津湖の場合 1.03 (cm/sec)、白鳥湖の場合 1.77 cm/sec (CASE 1)、1.17 cm/sec (CASE 2) であった。すなわち、矩形杭の貫入に伴う氷盤の歪速度は、最大氷力を与える 10^{-3} sec^{-1} のオーダーであった。氷厚（ h ）は、篠津湖の場合（0.119 m）、白鳥湖の場合（0.07 m）であった。よって、アスペクト比（ W/h ）は、14.3 と 2.5 である。

実験時において、氷盤貫入時の全氷力は、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求めた。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測定した。局部氷圧力の時間変化は、杭前面に取り付けた圧力センサーから測定した。杭幅（ W ）が 0.3 m の時は最大 15 個（5 cm 毎の水平間隔で 1 段に 5 個の全 3 段、sensor の径は 8 mm）、（ W ）が 1.0 m の時は最大 18 個（10 cm 毎の水平間隔で 1 段に 9 個の全 2 段、sensor の径は 8, 14 mm）



図—1 局部氷圧力測定用センサーの取り付け位置

* 正会員 工修, MS. 清水建設(株)技術研究所海洋環境G研究員

** 学生会員 北海道大学大学院 工学研究科

*** 学生会員 北海道大学大学院 工学研究科

**** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

のセンサーが取り付けられる (図-1). 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. 本研究では、氷厚の中心位置にある sensor no. 1~no. 9 (CASE 1, CASE 2), sensor no. 6~10 (CASE 3) から得られた氷圧力測定値を後の計算に用いた. これは、過去の佐伯ら (1983), Tanaka et al. (1987) らの実験結果を参考に、最大氷圧力を与える位置を考慮して決めた. 各実験時の氷盤の破壊の様子は、ビデオカメラにより収録し、その後の考察に用いた.

3. 実験結果と考察

3.1 全氷力

氷盤貫入試験時の全氷力の実験結果を図-2 (CASE 1), 図-3 (CASE 2) に示す. 杭の貫入にともなって、全氷力は最大値である初期氷力 (F) に到達する. その後、全氷力は一旦減少し微かな変動を伴ったほぼ一定値の継続氷力となり、この時氷盤は continuous crushing に起因した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、アスペクト比 (W/h) が (14.3) の時に 0.56 (CASE 1), 0.57 (CASE 2) となり、(W/h) が (2.5) の時には 0.67 (CASE 3) となった. これらの値は、Nakazawa and Sodhi (1990) らの報告に一致する. また、杭の貫入に伴う氷盤の破壊は、初期氷力時は杭前面にわたり水平方向の cleavage

crack であった. その後の継続氷力時は、杭前面の各領域において氷盤は非同時的な圧縮破壊を繰り返した. 全氷力がピークを迎えた時点で、杭前面の氷盤の形状はそれ以前の氷盤破壊に起因して不規則となり、その後の杭と氷盤の非一様な接触及びクラックが原因となって全氷力は初期氷力よりも小さくなる. このため、Kry (1978), Sanderson (1988) の指摘通り、大型構造物と氷盤の相互作用は、継続氷力時の氷盤の破壊現象と密接に関連している.

次に、貫入開始から初期氷力が発生するまでの貫入量 (a) は、2.60 cm (CASE 1), 2.25 cm (CASE 2), 1.47 cm (CASE 3) となった. 佐伯ら (1983) の海水を用いた実験結果では、(a) の値は 2.11~2.39 cm ($W=20$ cm, $h=12.0$ cm, 氷の歪速度は $2.05 \sim 2.64 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$) となる. (a) の値が小さいことは、氷盤に僅かな形状粗さがあると、氷盤は、凸部分において局部的に破壊し、その後非同時的に破壊することを示唆している.

3.2 全氷力、局部氷圧力間の関係係数

全氷力と局部氷圧力との関係係数を表-1 に示す. 貫入開始から初期氷力が発生するまでの範囲 (first peak range, F.P.R.) 及ぶ継続氷力が作用する範囲 (subsequent force range, S.F.R.) の関係係数の計算結果が表に示されている. (F.P.R.) では、各関係係数の値は大きいのにに対し、(S.F.R.) では関係係数の値は小さくなり、各センサー前面の氷盤破壊にともなった局部氷圧力の全氷力への寄与は小さくなる. 特に、(W/h) が大きくなるとこの寄与は小さくなる傾向を示す.

同様に、各局部氷圧力間の関係係数を計算した結果を表-2 に示す. (F.P.R.) では、高い関係係数を示すのに対して、(S.F.R.) では、低い関係係数を示す. (S.F.R.) では、(W/h) が 14.3 の時、関係係数の平均はゼロ近傍の値 ($-0.008, 0.037$ で危険率 5% の検定において無相関と判断された) となり、各センサー前

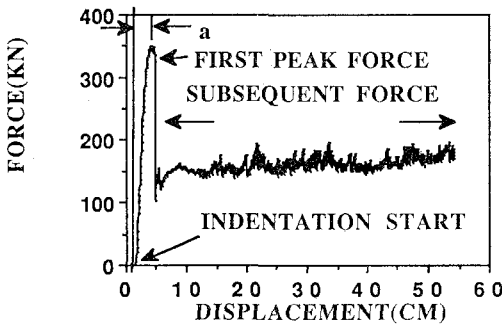


図-2 貫入量と全氷力の測定結果 (CASE 1)

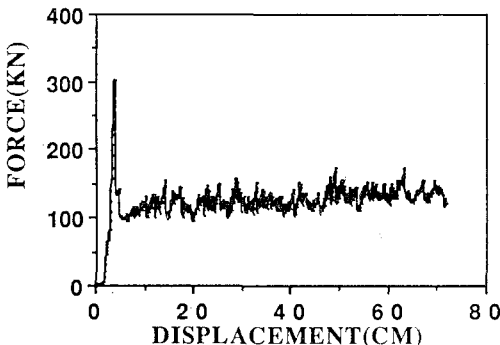


図-3 貫入量と全氷力の測定結果 (CASE 2)

表-1 関係係数 (全氷力と局部氷圧力)

実験番号	(W/h)	(F.P.R.)		(S.F.R.)	
		範囲	平均	範囲	平均
CASE 1	14.3	0.085~0.933	0.642	0.005~0.245	0.107
CASE 2	14.3	0.430~0.897	0.716	0.130~0.325	0.202
CASE 3	2.5	0.396~0.710	0.518	0.026~0.497	0.347

表-2 関係係数 (局部氷圧力と局部氷圧力)

実験番号	(W/h)	(F.P.R.)		(S.F.R.)	
		範囲	平均	範囲	平均
CASE 1	14.3	-0.13 ~ 0.998	0.516	-0.12 ~ 0.177	-0.008
CASE 2	14.3	0.256~0.986	0.676	-0.187~0.473	0.037
CASE 3	2.5	0.401~0.910	0.705	-0.113~0.804	0.227

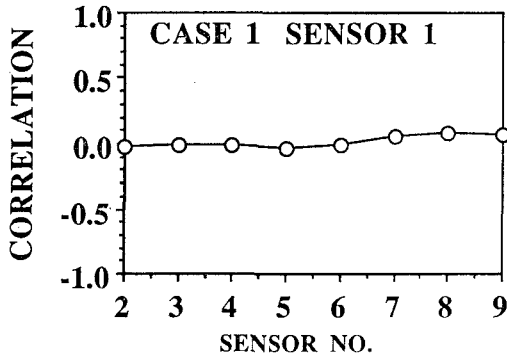


図-4 no. 1 と no. 2～no. 9 の相関係数 (CASE 1)

面の氷盤は独立に破壊していることを示す。この場合の例として、センサー no. 1 と no. 2～no. 9 の相関係数の結果をプロットしたものを図-4 に示す。しかし、 (W/h) が 2.5 の場合は、杭前面の氷盤の破壊は完全に独立とはならない。これは、独立破壊の領域にはある大きさがあることを示している。

3.3 氷盤の破壊特性

図-5 は、CASE 1 ($W/h=14.3$) における局部氷圧力の測定結果 (sensor no. 1～no. 9) を示す。貫入量が約 2.5～5 cm の範囲 (F.P.R.) では、sensor no. 2 を除いた全ての sensor がピークを与え、杭前面の氷盤はほぼ同時に破壊する。しかし、その後の各局部氷圧力は、それぞれ間欠的なピークとなり、氷盤は杭前面において非同時的、断続的に破壊 (crushing) することを示している。これは、(S.F.R.) の相関係数がゼロ近傍の値となることに対応している。

次に、図-6 に示す様に、ある基準圧力 (P_s) 以上のピーク値を取り出し、これらの間欠ピークの間隔を (L)、ピークの裾の幅を (dL)、ピーク値を (P) とする。ここでは、Saeki 式 (1980, 1986) と初期氷力の実測値から推定した一軸圧縮強度 (σ_c) を ($P_s = \sigma_c$) として用いた。この場合、(CASE 1) と (CASE 2) ではそれらの平均の (σ_c) = 6.85 (MPa)、(CASE 3) では (σ_c) = 4.49 (MPa) である。(CASE 1) では、sensor no. 1～no. 9 の各々 (dL , L , P) の測定値の平均を取ると、(dL) = 2.087 cm, (L) = 12.452 cm, (P) = 14.147 (MPa) となる。同様に、(CASE 2) では、(dL) = 1.972 cm, (L) = 9.925 cm, (P) = 13.603 (MPa) となる。(CASE 3) では、全体の貫入量が約 20 cm と少なかったために十分なデータが得られなかった。

(dL/h) の値は、0.298 (CASE 1), 0.282 (CASE 2) となる。Nakazawa and Sodhi (1990) らは、室内試験の結果から、 $(dL/h) = 0.18 \sim 0.24$ ($W/h = 0.8 \sim 3.0$) で、 W/h に影響されないことを報告している。また、Sodhi and Morris (1986) の円筒杭を用いた室内試験結

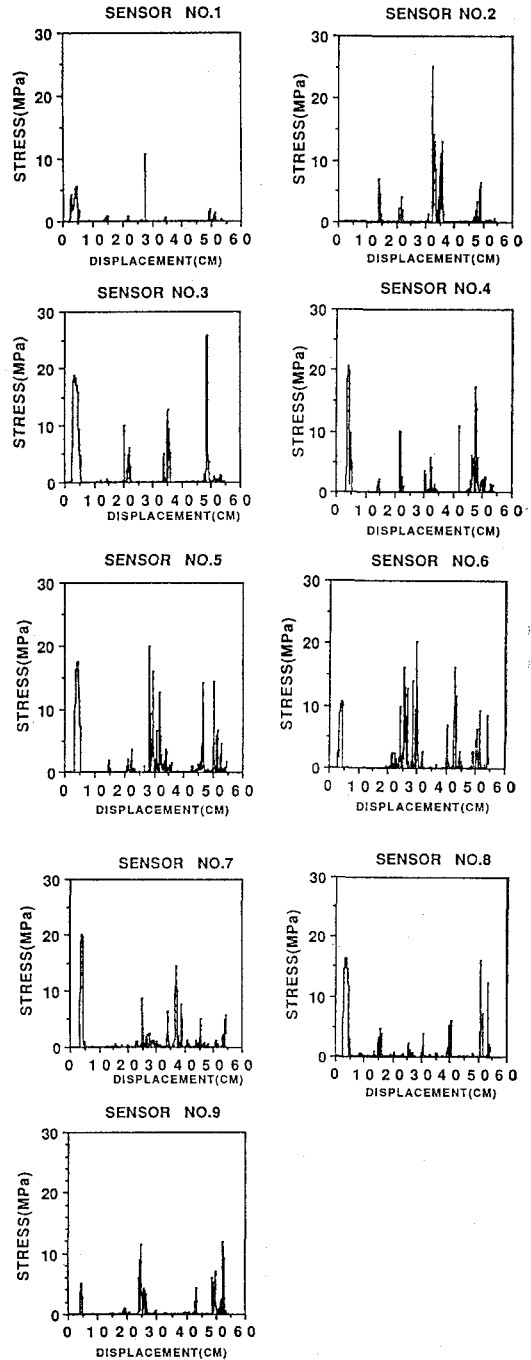


図-5 局部氷圧力の測定結果 no. 1～no. 9 (CASE 1)

果に基づく報告では、スペクトル解析による氷盤の卓越振動数から、 $(dL/h) = 0.1 \sim 0.6$ 、(平均 0.33, $W/h = 0.8 \sim 3.0$) を与えている。したがって、 $W/h = 14.3$ の条件下の本実験結果は、これらの室内試験結果に一致すると判断される。また、この (dL) は氷盤の断続的な crushing 破壊と対応している。

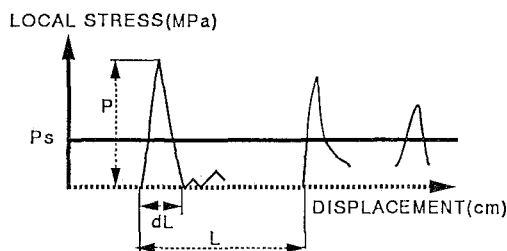


図-6 局部氷圧力ピークの生成過程

(L/h) の値は, 1.78 (CASE 1), 1.42 (CASE 2) となった. この値についての過去の報告はない.

以上, (L) の値, 各センサーの取り付け間隔, 相関係数の結果から, 全氷力に顕著に寄与する氷盤の破壊片 ($P_s = \sigma_c$ の時) は約 $(L) \cdot (L) \cdot h$ と推定される.

局部氷圧力の最大値 (P_{max}) は, 16.1 (MPa) (CASE 3), 25.6 (MPa) (CASE 1), 31.9 (MPa) (CASE 2) となり, (P_{max}/σ_c) は 3.6 (CASE 3), 3.7 (CASE 1), 4.7 (CASE 2) となった. これらの値は, 佐伯ら(1983)の海水を用いた実験結果にほぼ一致する.

3.4 Ashby et al. モデル (1986) への適用

Ashby et al. モデルに本実験データを適用するため, 修正した次式から非同時破壊時の全氷力の極値 (EF) を算定した. 上記モデルには, (dL/L) が小さいという仮定があるが, 本実験結果を基に (dL/L) の値を考慮した. ここで, 氷盤の独立破壊領域の大きさは, $L \cdot L \cdot h$ としている.

$$(EF) = A \cdot (1 + K \cdot B \cdot (1/(W)^{0.5})) \cdot W \cdot h$$

where $A = (P/2) \cdot (dL/L)$ (MPa),

$$B = (L \cdot L / dL \cdot (1 - dL/L))^{0.5} \text{ (m}^{0.5}\text{)}, \text{ and}$$

K = 標準偏差に掛ける倍数

本実験結果 (dL, L, P) ($P_s = \sigma_c$ の時) を用いて計算された (EF) と継続氷力の実測値を比較したものを 図-7, 8 に示す. 実測値は, $K=2$ とした場合の推定値を越えなかった. 加えて, 上式は, (W) が増大するにつれ $(W)^{0.5}$ に比例して (EF) が増大することを示し, Saeki et al. (1980, 1986) や Hirayama et al. (1974) が提案した実験式と対応する.

4. 結 論

① 継続氷力と初期氷力の比は, アスペクト比 (W/h) が (14.3) の時に 0.56 (CASE 1), 0.57 (CASE 2) となり, (W/h) が (2.5) の時には 0.67 (CASE 3) となった. これらの値は, Nakazawa and Sodhi (1990) らの報告に一致する.

② 貫入開始から初期氷力が発生するまでの貫入量 (a) の値が 2.25~2.6 cm ($W/h=14.3$), 1.47 cm ($W/h=2.5$) と小さいことは, 氷盤に僅かな形状粗さがある

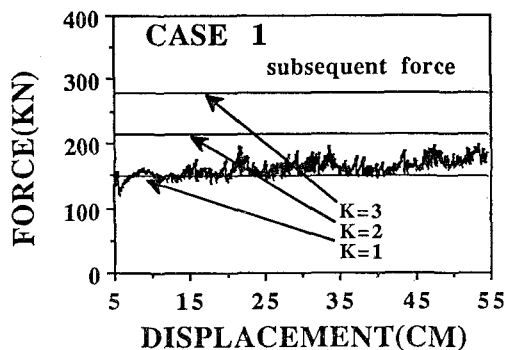


図-7 算定全氷力の極値と実測全氷力の比較 (CASE 1)

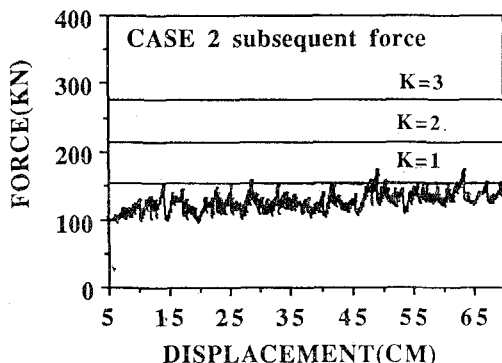


図-8 算定全氷力の極値と実測全氷力の比較 (CASE 2)

と, その凸部分において局部的に破壊が発生することを示唆した.

③ 全氷力と局部氷圧力間の相関係数は, (F.P.R.) の時に比較し (S.F.R.) の時は低い値を示すことから, 初期氷力時よりも継続氷力時の局部氷圧力の全氷力に対する寄与は小さくなる.

④ 各局部氷圧力間の相関係数は, (F.P.R.) では大きく, 杭前面の氷盤の破壊は非同時的ではないことを示した. 一方, (S.F.R.) の相関係数の値は, アスペクト比 (W/h) が 14.3 の時ゼロ近傍の値を示すことから, 各センサーの幅 (10 cm) 間の前面の氷盤は独立に破壊すると判断できる. しかし, アスペクト比 (W/h) が 2.5 の時は, 杭前面の氷盤は完全な独立破壊とはならない.

⑤ 継続氷力時の杭前面の氷盤の破壊は, 局部氷圧力が間欠的なピークを示すことから, 断続的な crushing 破壊となる. (W/h) が (14.3) かつ $(P_s) = \sigma_c$ の条件下では, 杭前面の氷盤の破壊片の大きさは, 約 $L \cdot L \cdot h$ と推定された. (dL/h) の値は, 0.282~0.298 ($W/h=14.3$) となり, Sodhi and Morris (1986), Nakazawa and Sodhi (1990) らの室内試験結果に一致すると判断出来る. (L/h) の値は, $W/h=14.3$ の時 1.42, 1.78 となった.

⑥ 局部氷圧力の最大値と一軸圧縮強度の比 ($P_{\max}/\sigma_c$) は, 3.6 ($W/h=2.5$), 3.7 と 4.7 ($W/h=14.3$) となり, 過去の佐伯ら (1983) の海水を用いた実験結果にはほぼ一致する. また, 局部氷圧力が 30 MPa を越える計測結果もあることから, 構造物の安定のみならず拘束時の氷の強度と関連した局部氷圧力を考慮した構造部材の設計を行う必要がある.

⑦ Ashby model と本実験データ (dL, L, P) ($W/h=14.3$, $P_s=\sigma_c$) とに基づいて計算される全氷力の極値 (平均値 $+K \times$ 標準偏差) は $K=2$ の時, 実測値を越えない.

今後は, アスペクト比の更に大きい実験及びデータの補足を行う必要がある. また, 著者らは, フィールド実験を行うに当たり次の方々にお世話になった. 紙面を借いて感謝の意を表したい. 秋田工業高等専門学校榎国夫教授, 運輸省船舶技術研究所田淵浩文氏, 西村組今泉章氏, 北海道大学工学部六本木宏一氏, 国松靖氏である.

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.

Kry, P. R. (1978): A statistical prediction of effective ice crushing stresses on wide structures, Proc. IAHR, part 1, pp. 33-47.

Hirayama, K., J. Schwarz and H. C. Wu (1974): An investigation of ice forces on vertical structures, IIHR Report No. 158. University of Iowa, Iowa City.

Nakazawa, N. and S. Sodhi (1990): Ice forces on flat, vertical indentors pushed through floating ice sheets, CRREL Special Report 90-14.

Saeki, H. and A. Ozaki (1980): Ice forces on piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. Per Tryde, Springer-Berlag, pp. 342-350.

佐伯 浩・田中祐人・小野敏行・酒井雅史・尾崎 晃 (1983): 直立杭構造物に作用する氷圧分布と氷盤の破壊周期について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 653-657.

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): IEC MECHANICS-risks to offshore structures, Graham & Trotman, pp. 1-253.

Sodhi, D. S. and C. E. Morris (1986): Characteristic frequency of force variations in continuous crushing of sheet ice against rigid cylindrical structures, Journal of Cold Regions Science and Technology, 12, pp. 1-12.

Tanaka, S., H. Saeki and T. Ono (1987): The distribution of ice pressure acting on offshore pile structure and the failure mechanics of ice sheet, Journal of OMAE, Vol. 1, pp. 85-92.