

氷海構造物に作用する氷荷重の推定

竹内 貴弘
(技術研究所)

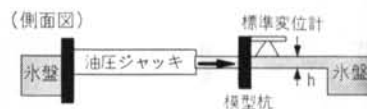
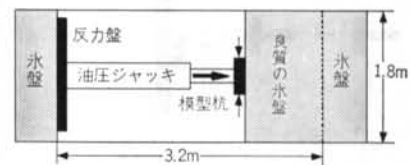
§ 1. はじめに

氷象条件の厳しい海域に建設される海洋構造物の支配外力は、氷力となる場合が多い。これらの海域に建設される構造物には、厳しい環境条件に耐えるだけの安全性が要求されるため、構造物は大型なものとなる。現時点では、構造物と相互作用したときの氷盤の破壊、および氷盤の力学的性質が明らかにされていないことが、氷力評価を行なう上での障害となっている。構造物に作用する氷力の算定式は、構造物が鉛直・傾斜壁を有する両方の場合において、理論・実験・経験的に多数提案されている¹⁾²⁾。これらの多くは、氷盤と構造物が理想的な条件で相互作用したときに構造物に伝達される最大氷力(初期氷力)から評価されてきた。この場合、①氷盤と構造物は一樣に接触した状態で相互作用を開始する、②構造物前面の氷盤は構造物幅にわたって同時に破壊する、③氷厚は一定である、④氷盤を移動させる driving force の大きさに制限がないとの仮定がある。これらの仮定は、実海域においては成立せず^{3)~10)}、氷力の過大評価をもたらす。この傾向は、構造物が大型化するほど顕著になる。この過大評価の原因として特に、独立破壊領域における氷盤の非同時的破壊の効果が指摘されている^{5)~7)}。また、この氷盤の非同時的破壊は、氷盤と構造物の不規則な接触と密接に関連している^{5)~7)}。本研究では、第一に構造物模型(模型杭)を用いた現地氷盤貫入試験を行ない、氷盤の非同時的破壊、および氷盤と構造物の不規則接触が氷力へ与える効果を検討した。第二に、独立破壊領域における氷圧力の時系列データの確率特性を調べ、これを再現することを目的とする。これは、氷盤の破壊現象が確率的であること、実氷盤の強度にはばらつきが大きいことによる。ここでは、降雨の流量予測に適用された Shot Noise Model¹¹⁾ の、氷圧力データへの適用性について検討する。本報では、再現されたデータを基に、非同時破壊時の全氷力の定量評価に必要な構造物と氷盤の接触率、および貫入試験ができない大型海洋構

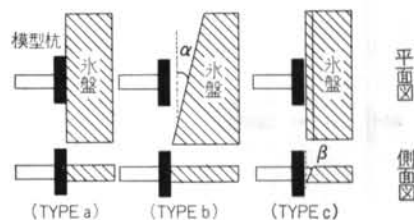
造物に作用する全氷力を推定することを目的としている。

§ 2. 現地氷盤貫入試験

試験は、北海道の白鳥湖で行なった。現地の氷は、淡水氷で氷厚が約30cm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、図一1に示したように現地氷盤を1.8m×3.2mの広さで取り除き、新たに良質の氷盤を生成した。結氷中は、氷盤上を完全に除雪した。氷盤先端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、図一2に示されている3通りの氷盤形状で試験を行なった。この場合、氷厚は一定とした。試験条件を表一1に示す。貫入杭の幅(W)は1.0mである。貫入速度(V)は、氷盤の貫入に伴うひずみ速度が、最大氷力を与える 10^{-3} sec^{-1} の



図一1 現地氷盤貫入試験概要

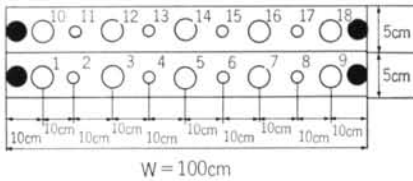


図一2 氷盤と構造物の接触条件

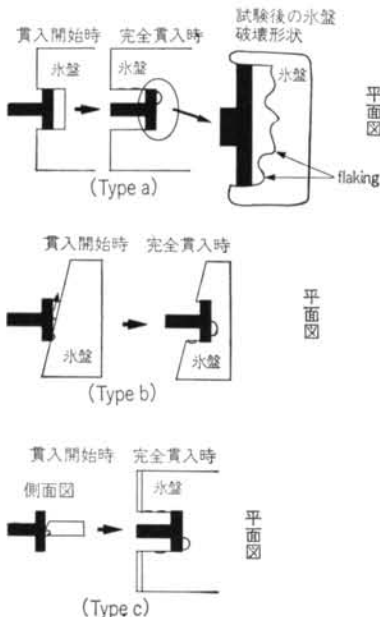
オーダーとなる速度である。ひずみ速度 ($d\varepsilon/dt$) は Michel¹²⁾ の提案式で計算した。アスペクト比 (W/h) は 11.4~15.4 である。氷の強度は氷温に強く影響されるために、一連の実験は外気温がほぼ同一となるように日程を調節して行なった。この場合、それぞれ、実験 1~実験 3, 実験 4~実験 7, 実験 9~実験 11 の氷の強度は一定となるよう配慮した。試験装置は、水上移動および、

実験番号	氷厚 (cm)	貫入速度 (cm/sec)	歪速度 (sec^{-1})	氷盤形状 (deg)
1	7.0	1.77	0.0043	$\alpha = \beta = 0$
3	7.0	1.17	0.0029	$\alpha = \beta = 0$
4	7.0	1.35	0.0034	$\alpha = \beta = 0$
5	6.5	1.08	0.0027	$\alpha = 5.09$
6	6.5	1.08	0.0027	$\alpha = 9.82$
7	6.5	1.11	0.0028	$\alpha = 29.68$
9	8.8	1.16	0.0029	$\beta = 6.27$
10	8.8	1.16	0.0029	$\beta = 13.42$
11	8.8	1.16	0.0029	$\alpha = \beta = 0$

表一 試験条件



図一 3 局部氷圧力測定用センサーの取り付け位置



図一 4 氷盤の破壊形態の概要

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製作されている。全氷力は、油圧ジャッキ内の圧力を圧力センサで測定し、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化は、杭前面に取り付けた圧力センサ (10cm 毎の水平間隔で 1 段に 9 個の全 2 段、センサの径は 8 および 14mm) から測定した。圧力センサを取り付けたパネルは、ステンレス製で十分な剛性を有している (図一 3)。本報では、氷厚の中心位置にあるセンサ no. 1~no. 9 から得られた氷圧力測定値を後の計算に用いた。これは、佐伯ら¹³⁾、Tanaka et al.¹⁴⁾ の実験結果を基に、最大氷圧力を与える位置を考慮して決定した。

§ 3. 試験結果と考察

3.1 氷盤の破壊形態

図一 4 に、3 種類の氷盤形状に対する氷盤の破壊形態の概要を示す。Type a の場合 (実験 1) では、模型杭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、氷盤は各領域において非同時的に flaking を伴う圧縮破壊を繰り返しながら、構造物へ断続的な水力を伝達した。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。模型杭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。Type b の場合 (実験 6) では、模型杭の貫入によって、前面の氷盤は横方向に排除される破壊形態となった。模型杭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 (実験 10) では、模型杭前面の氷盤は初めに圧縮された状態で破壊し、その後水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、氷盤が模型杭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 において模型杭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、flaking を伴う圧縮破壊を繰り返す非同時的な破壊となった。

3.2 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一 5 (実験 1) に示す。全氷力は最大値である初期氷力 (F) に到達した後、いったん減少し微少な変動をともなったほぼ一定値の継続氷力となり、このとき氷盤は flaking を伴う非同時的な圧縮破壊をする。継続氷力の

最大値を(F')とすると、(F'/F)の値(表—2)は、Nakazawa and Sodhi¹⁵⁾の報告と対応している。Type bの場合、模型杭の貫入量に対する全氷力の測定結果を図—6(実験6)に示す。図—5と図—6の比較から明らかのように、氷盤先端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、継続氷力のみが作用することがある。同様に、 $\alpha=5.09(\text{deg})$ 、 $\alpha=29.68(\text{deg})$ の両場合においても、初期氷力は継続氷力を越えない。Type cの場合、模型杭の貫入量に対する全氷力の測定結果を図—7(実験11)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、継続氷力のみが作用する状態となった。しかし、 $\beta=6.27(\text{deg})$ 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。

3.3 貫入開始から初期氷力発生までの貫入量

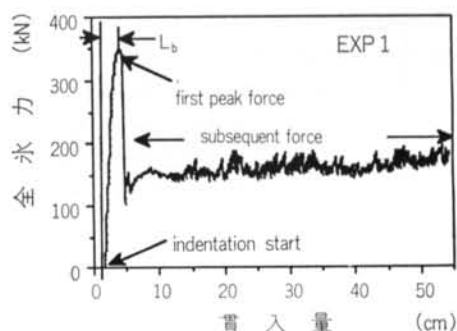
貫入開始から初期氷力が発生するまでの貫入量(L_b)とする。表—2に示されたとおり、氷厚が大きくなるにつれて(L_b)の値は小さくなる。この結果は、佐伯ら¹⁶⁾の海水を用いた実験結果に一致する。すなわち、氷盤先端部の凸部が(L_b)より大きい場合には、氷盤は凸部分において局部的に破壊することを示している。この(L_b)の値は、(W)、(h)、(σ_c)に依存する可能性があるために、その量的評価は今後のデータに期待せざるを得ない。しかし、本実験結果では、氷厚が6.5cmのとき6.0cm以下(実験4～実験7)、氷厚が8.8cmのとき2.0cm以下(実験9～実験11)、氷厚が7cmであっても(σ_c)が6.85MPaのときは2.6cm以下となり、氷厚・圧縮強度の増大とともに(L_b)の値は小さくなる。これは、実海域での氷象条件の厳しい場合には、この(L_b)は更に小さな値となることが推測され、また、実海域の氷盤先端部の形状は非常に不規則であるために⁹⁾、現実的には初期氷力が発生することは殆どなく、非同時的破壊が卓越する。

3.4 局部氷圧力

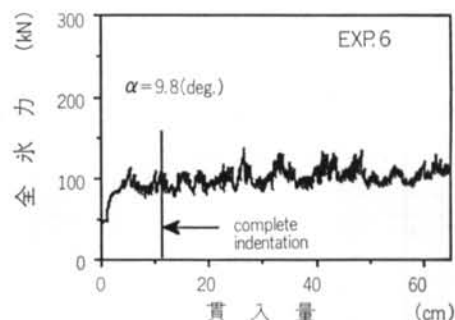
図—8は、実験1($W/h=14.3$)における局部氷圧力の測定結果(センサno.1～no.9)である。貫入量が約2.5～5cmの範囲では、センサno.2を除いたすべてのセンサがピークを与え、杭前面の氷盤はほぼ同時に破壊する。しかし、その後の各局部氷圧力はそれぞれ間欠的なピークとなり、氷盤は杭前面において非同時的、断続的に圧縮破壊することを示している。また、ここで実験1と実験3において、貫入開始から初期氷力が発生するまでの範囲(first peak range)、および継続氷力が作用する範囲(subsequent force range)をそれぞれF.P.R., S.F.R.とする。各局部氷圧力間の相関係数を計算した結果を表

実験番号	F (kN)	F' (kN)	L_b (cm)	σ_c (MPa)
1	349.6	195.8	2.60	6.85
3	302.6	172.5	1.47	6.85
4	222.9	170.0	4.69	6.88
5	—	190.9	5.97	6.88
6	—	136.9	5.59	6.88
7	—	131.0	4.67	6.88
9	273.8	239.6	1.91	4.74
10	—	237.6	1.46	4.74
11	272.1	194.9	1.60	4.74

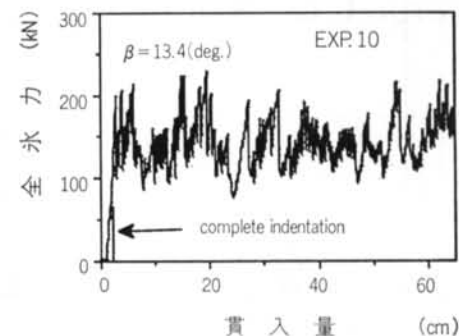
表—2 試験結果



図—5 貫入量と全氷力の測定結果(実験1)



図—6 貫入量と全氷力の測定結果(実験6)



図—7 貫入量と全氷力の測定結果(実験10)

一3に示す。F.P.R. では、高い相関係数を示すのに対して、S.F.R. では相関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、各センサ前面の氷盤は独立に破壊している。次に、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、一軸圧縮強度(σ_c)を(P_s)= (σ_c) として用いた。この場合、実験1ではセンサno.1~no.9の各々の(dL , L , P)の測定値の平均を取ると、(dL)=2.087cm, (L)=12.452cm, (P)=14.147(MPa)となる。同様に、実験3では(dL)=1.972cm, (L)=9.925cm, (P)=13.603(MPa)となる。(dL/h)の値は、0.298(実験1), 0.282(実験3)となる。Nakazawa and sodhi¹⁵⁾は、室内試験の結果から(dL/h)=0.18~0.24(W/h =0.8~3.0)で、 W/h に影響されないことを報告している。また、Sodhi and Morris¹⁷⁾の円筒杭を用いた室内試験結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)=0.1~0.6、(平均0.33, W/h =0.8~3.0)を与えている。よって、 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ほぼ等しい。また、この(dL)は氷盤の断続的な圧縮破

壊と対応している。(L/h)の値は、1.78(実験1), 1.42(実験3)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($P_s = \sigma_c$ のとき)は約(L) \times (L) \times h と推定される。この独立破壊領域の大きさ(A_f)を0.007 m^2 とする。Kry⁷⁾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貫入氷圧力が減少することを示すモデルを提案している。しかし、上記のデータは、急激な上昇・下降を表わす間欠的なピークを示し、対数正規分布の仮定には従わず、新たな手法が必要である。

実験番号	W/h	F.P.R		S.F.R	
		範囲	平均	範囲	平均
1	14.3	-0.13~0.998	0.516	-0.12~0.177	-0.008
3	14.3	0.256~0.086	0.676	-0.187~0.473	0.037

表-3 局部氷圧力相互間の相関係数

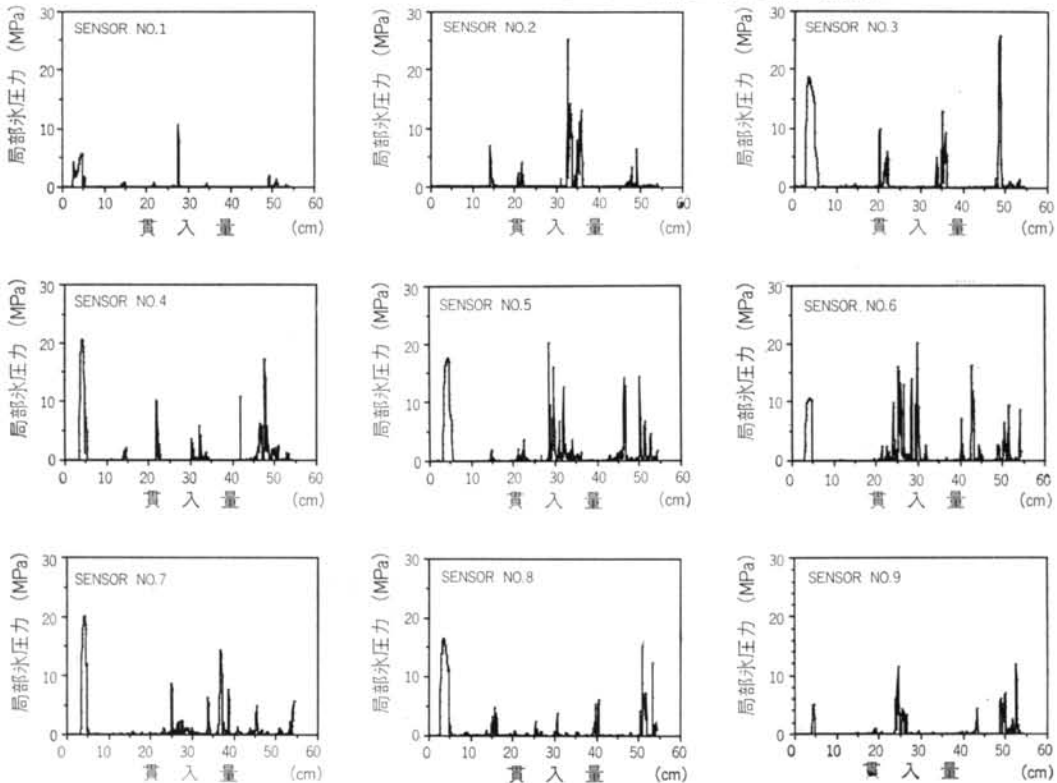


図-8 局部氷圧力の測定結果No.1~No.9(実験1)

§ 4. 非同時破壊時の貫入氷圧力

4.1 Shot Noise Model

降雨に伴う時間単位の短い流量時系列を再現するために適用された Shot Noise Model (SNM)¹¹⁾ を用いて、氷圧力の時系列データの再現性を検討する、これは、上昇・下降を示す間欠的なピークのカストロフィー成分を表現でき、氷圧力のデータと類似しているためである。

SNM は、以下の式で表わされる。

$$X(t) = \sum_{m=N(-\infty)}^{N(+\infty)} y_m \cdot \exp\{-b(t-\tau_m)\} \quad (1)$$

ここで、 $N(t)$ は、事象発生率 ν のポアソン過程、 y_m は時刻 τ_m における降雨量(氷圧力)に相当し平均 θ の指数分布に従う変数、 b は低減係数、 τ_m は降雨の事象の生起時刻である。また、この式により発生される $X(t)$ は、 Γ 分布に従うことが知られており、この過程のパラメータと $X(t)$ の積率の関係は、 ν 、 θ 、 b の値により推定可能となる。この時系列発生方法を局部氷圧力の場合に適用し、実験データとの比較を行なった。 Γ 分布は、以下のように与えられる。 $f(X)$ は確率密度関数である。

$$f(X) = \{1/\Gamma(a)\} \cdot (1/\theta)^a \cdot X^{a-1} \cdot \exp(-X/\theta) \quad (2)$$

$$\text{ここで、} a = \nu/b \quad (3)$$

$$\text{平均値 } \mu = \theta \cdot a \quad (4)$$

$$\text{分散 } \sigma^2 = \theta^2 \cdot a \quad (5)$$

$$\text{相関係数 } \rho[X(t), X(t+s)] = \exp(-b \cdot s) \quad (6)$$

$$\text{ひずみ係数 } \beta_1 = 2 \cdot (1/a)^{0.5} \quad (7)$$

$$\text{とがり係数 } \beta^2 = 6 \cdot (1/a) + 3 \quad (8)$$

シミュレーションのための基本式は、式(1)から次の式で与えられる。

$$X(t+1) = e^{-b} \cdot X(t) + \sum_{m=N(t)}^{N(t+1)} y_m \cdot \exp\{-b(t+1-\tau_m)\} \quad (9)$$

上式に基づき、各独立破壊領域の氷圧力データの時系列を独立破壊領域の数 (n) {= 貫入面積 A (構造物幅 \times 氷厚)/独立破壊領域の面積} だけ発生させ、これらを重ね合わせることで構造物と氷盤の接触数、全氷力を推定する。

4.2 実験データと模擬データの比較

4.2.1 氷圧力の時系列データ

氷圧力の実験データから ν 、 θ 、 b の値を式(3)~(6)式より推定し(表-4)、式(9)に従って模擬データを発生させ、一軸圧縮強度で無次元化すると図-9 のようになる。この表の ν 、 θ 、 b は、9 センサから得られた値の平均で

ある。間欠的なピークがランダムな時間に発生する時系列となり、実験データの例(図-10)に類似している。実験データの確率分布への適合性を調べたところ、センサの位置によってデータにばらつきがあり、最適な分布を決定することは困難であった。そこで、実験データから一軸圧縮強度よりも大きいデータを取り出し、確率特性を調べた。これは、実験データが間欠的なピークを示し、このピークの部分が氷力へ貢献すること、およびピーク以外の部分の値は小さく無視できるためである。

4.2.2 構造物と氷盤の接触数

初めに、独立破壊領域の数 (n) だけ局部氷圧力の時系列を発生させ、それぞれ1024点の貫入量において一軸圧縮強度より大きい局部氷圧力を与える時系列の数を (n_c) とする。この (n_c) に関して、以下の式で示されるポアソン分布への適合性を検討する。 $fpp(n_c)$ は確率密度関数、 $fpc(n_c)$ は分布関数である。

$$fpp(n_c) = [(m)^{n_c}/n_c!] \cdot \exp(-m) \quad (10)$$

($n_c = 0, 1, 2, \dots, n$)

実験番号	θ	b	ν
1	7.96	0.088	0.0089
3	6.12	0.158	0.0287
5	3.21	0.147	0.0565
6	6.12	0.153	0.0156
7	4.88	0.203	0.0101

表-4 Shot Noise Model パラメータの推定値

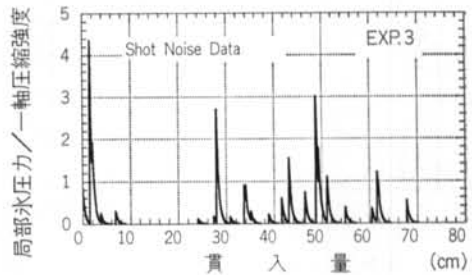


図-9 Shot Noise Model による模擬データ

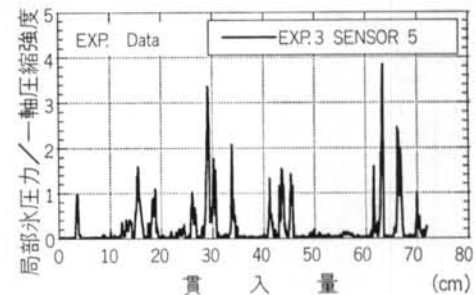


図-10 氷圧力実験データの例(実験3 センサ5)

$$fpc(n_c) = \sum_{n_c=0}^n [(m)^{n_c} / n_c!] * \exp(-m) \quad (11)$$

(m)は全データ数1024点に対する(n_c)の平均である。また、(n_c)の最大値を(n_m)とし、 $n=9$ のときの実験データと Shot Noise Data (SND) の結果を表-5に示す。計算結果の例を図-11、図-12に示す。 χ^2 -検定では、危険率0.05かつ実測度数10の場合 $\chi_0^2=16.92$ となり、表-5から $\chi^2 < \chi_0^2$ を満たすために、接触数(n_c)は以下のポアソン分布で近似できる。すなわち、全体($n=9$)に対して最大の接触数は3となり、氷盤の破壊は構造物幅全体にわたり同時には発生していないことが分かる。

次に、貫入面積 A (構造物幅 * 氷厚) が大きい場合を計算する。参考までに構造物幅が100m、氷厚2mのと

実験番号	実験データ			Shot Noise Data		
	m	n_n	χ^2	m	n_m	χ^2
1	0.175	3	1.6	0.298	2	10.9
3	0.338	3	4.5	0.358	3	12.9
5	0.403	3	7.1	0.530	3	16.4
6	0.362	2	6.4	0.425	3	1.7
7	0.340	3	4.6	0.134	1	6.4

表-5 実験データと Shot Noise Data による m , n_m , χ^2 の値 (Poisson分布)

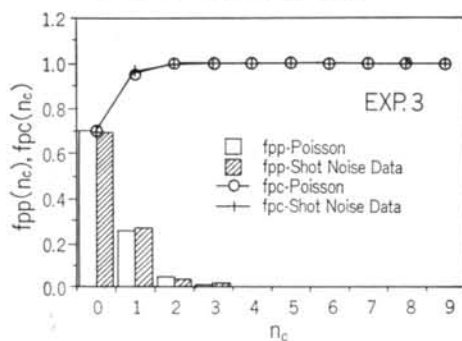


図-11 n_c の Poisson 分布への適合性 (SND)

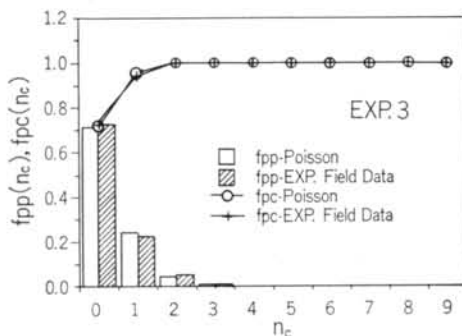


図-12 n_c の Poisson 分布への適合性 (実験データ)

き、 n は28572となるため、 $n=100, 1000, 10000, 30000$ の値を用いて計算する。この n の数だけ時系列を発生し、各時間 (一時系列当り1024点) における一軸圧縮強度よりも大きい時系列の数を合計し、この中で全体1024点中最大(n_m)となる値を計算する。 (n) が大きいときは中心極限定理より正規分布で近似できる。 $(m) = n * P_c$ とおき、 $n=100, 1000, 10000$ のときの (m) の計算結果から P_c はほぼ一定値をとり、このとき P_c は表-6のようになる。よって、平均 ($n * P_c$)、標準偏差 ($n * P_c$)^{0.5} の正規分布に従う乱数を発生させることにより、接触数が計算できる。これらのデータを基に、最大接触率 (= 最大接触面積 / 貫入面積) と貫入面積の関係を計算したものが図-13となる。ここで、最大接触面積は、[最大の接触数 (n_m) * 独立破壊領域の面積 (A_f)] で与えられる。SNDと現地データは、非常に近い値を示す。また、貫入面積の増大に伴い最大接触率は大幅に低減し、 $A=10m^2$ を超えるとほぼ一定値を示すようになる。

4.2.3 氷圧力データの確率分布

氷圧力を一軸圧縮強度で割った値を (f) として、この値の以下で示される Weibull 分布への適合性を検討する。 $fwp(f)$ は確率密度関数、 $fwc(f)$ は分布関数である。

$$fwp(f) = (M/\alpha_1) * (f - \gamma_1)^{-(M-1)} \exp[-\{(f - \gamma_1)^M\} / \alpha_1] \quad (14)$$

$$fwc(f) = 1 - \exp[-\{(f - \gamma_1)^M\} / \alpha_1] \quad (15)$$

実験番号	P_c			
	$n=100$	$n=1000$	$n=10000$	平均値
1	0.029	0.028	0.027	0.028
3	0.040	0.039	0.041	0.040
5	0.058	0.059	0.060	0.059
6	0.035	0.036	0.037	0.036
7	0.011	0.011	0.011	0.011

表-6 n に対する P_c の値

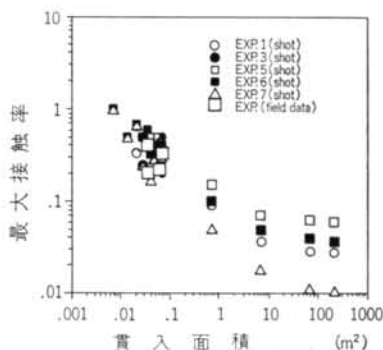


図-13 最大接触率と貫入面積の関係

計算結果を表-7, 表-8に示す。その相関係数(R)から, Weibull分布近似が成立する。Mの値が1に近いことは, 指数分布に近くなることを示している。また, 水文量の上位標本値の分布が指数分布に従う場合が多いことが知られている¹⁸⁾が, この氷圧力の場合もこれに近い結果となっている。計算結果の例(図-14, 図-15)から明らかのように, 直線に近く Weibull分布近似が成立する。

4.3 貫入氷圧力の推定

上記の確率分布の結果に基づき, 全氷力(T_f)を次のよ

実験番号	γ_1	α_1	M	R	平均
1	1.0	1.01	1.14	0.98	1.83
3	1.0	0.73	0.92	0.98	1.70
5	1.0	0.48	1.19	0.99	1.52
6	1.0	0.86	0.96	0.99	1.88
7	1.0	0.89	0.92	0.97	1.90

表-7 実験データの Weibull パラメータの推定値

実験番号	γ_1	α_1	M	R	平均
1	1.0	0.77	0.89	0.99	1.83
3	1.0	0.68	0.94	0.99	1.69
5	1.0	0.53	0.99	0.99	1.53
6	1.0	0.99	0.95	0.99	2.05
7	1.0	0.83	1.06	0.98	1.88

表-8 SND の Weibull パラメータの推定値

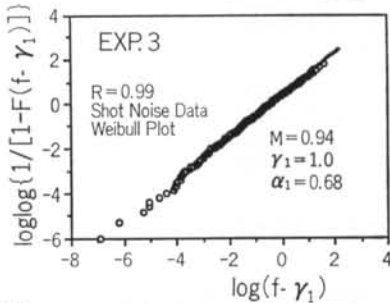


図-14 f の Weibull 分布への適合性 (SND)

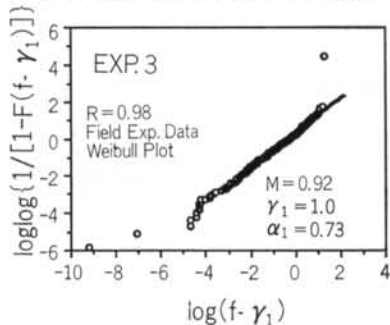


図-15 f の Weibull 分布への適合性 (実験データ)

うに計算する。氷盤と構造物の接触数 {contact no.} は, 正規分布に従う変数とする。{ f }の値もパラメータ(M, α_1, γ_1)の Weibull 分布に従う変数とする。また, 一軸圧縮強度(σ_c)の値も平均(μ_s), 標準偏差(σ_s)の正規分布に従う変数とする¹⁹⁾²⁰⁾。計算に用いたパラメータ(σ_c)は, サロマ湖の一年海水データ(氷温 $-3, -10^\circ\text{C}$)¹⁹⁾および多年圧力氷脈(氷温 $-5, -20^\circ\text{C}$)²⁰⁾データで, 氷のひずみ速度が 10^{-3} sec^{-1} の条件下で得られた値(表-9)を用いた。ここで, 全氷力(T_f), 貫入氷圧力(P_f)を確率的に次式で計算した。

$$(T_f) = \{\text{contact no.}\} * \{f\} * \{\sigma_c\} * \{A_f\} \quad (10)$$

$$(P_f) = \{T_f/A\} \quad (11)$$

計算は, 各実験条件下で, それぞれ $n=10, 100, 500, 1000, 5000, 10000, 30000$ の場合について行なった($A=0.07, 0.7, 3.5, 7, 35, 70, 210 \text{ m}^2$)。ここで, 乱数を10000個発生させ(T_f の繰返し計算を行なった。図-16に, 一年氷($\sigma_c=4.37 \text{ MPa}$)と多年圧力氷脈($\sigma_c=9.63 \text{ MPa}$)における, 貫入面積(A)と貫入氷圧力(P_f)の関係を示す。ここでは, 計算された10000個の(P_f)の小さい方から並べて9901番目のデータを1%超過確率値としてプロットしてある。貫入面積(A)の増大に伴い貫入氷圧力(P_f)が低減し, Ashby et al.⁶⁾の結果と同様の傾向を示す。同時に, Sanderson⁶⁾の Pressure-Area Curve に示された現地実測データとの比較を示した。本計算は, 氷盤と構造物の接触状態に主に注目したために, 貫入面

一年海水		多年圧力氷脈	
氷温 -3°C	氷温 -10°C	氷温 -5°C	氷温 -20°C
4.37 ± 1.51	5.96 ± 2.31	6.06 ± 1.63	9.63 ± 1.39

表-9 一軸圧縮強度の平均±標準偏差 (MPa)

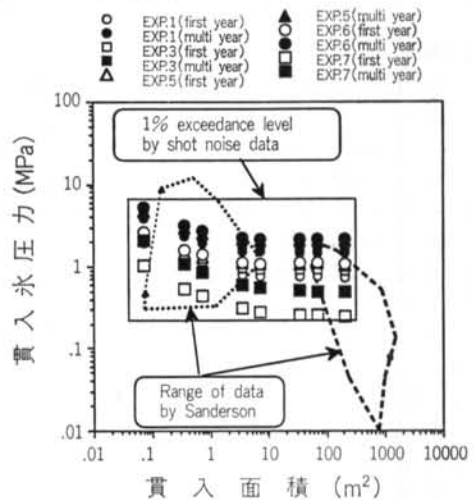


図-16 貫入面積 (A) と貫入氷圧力 (P_f) の関係

積(A)の全領域にわたって(P_f)の値を推定することは困難である。しかし、貫入面積(A)の大きい領域($A > 10 \text{ m}^2$)では非同時破壊が卓越し、多年圧力氷脈を用いた計算値は実測値の上限を与えている。局部氷圧力に関して公表されたデータが極めて少ないために、本計算は、限られた条件下で得られたデータから推定した ν , θ , b , A_f に基づき行われた。種々の条件下でのデータを補充することにより、本計算手法の有効性が増大すると考えている。

§ 5. 結論

(1)局部氷圧力相互間(S.F.R.)の相関係数は、ゼロ近傍の値を示すことから、各センサ間(10cm)では、氷盤は独立に破壊している。また、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し、flakingを伴う断続的な圧縮破壊となる。本試験条件下では、氷盤独立破壊領域の面積は約 0.007 m^2 と推定された。

(2) $W/h=11.4\sim 15.4$ では、 α が約 $5(\text{deg})$ 、 β が約 $13(\text{deg})$ 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。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、圧縮強度が大きくなるに従い小さくなるという傾向が現われた。この事実は、氷厚が大きい海域では、氷盤先端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。したがって、氷盤に僅かな形状粗さがあると非同時的破壊が卓

越する。

(3)Shot Noise Modelに基づき、急激な上昇・下降を示す氷圧力の時系列データをシミュレートする方法を提案した。実験データと Shot Noise Data のしきい値(一軸圧縮強度)よりも大きい氷圧力値(実際には一軸圧縮強度の倍数值)は、両データともに Weibull 分布に適合した。実験データと Shot Noise Data のしきい値(一軸圧縮強度)よりも大きいセンサーの数は、独立破壊領域の数(n)が小さいときは、両データともに Poisson 分布に適合した。独立破壊領域の数(n)の数が大きいときは、中心極限定理より正規分布で近似できる。独立破壊領域の数 n が $10\sim 30000$ (北極海での典型的な一年氷の条件では、構造物幅 100 m 、氷厚 2 m となり $n=28572$ である)の範囲の最大接触率(最大接触面積/貫入面積)を計算し、貫入面積が大きくなると最大接触数(率)は大幅に減少することを示した。

(4)上記の確率分布を用いて、貫入面積の増大に伴い貫入氷圧力の極値が減少することを、氷盤と構造物の接触率に注目し非同時的破壊の概念に基づき示した。

謝辞 本報は、北海道大学工学部との共同研究の成果を取りまとめたものである。本研究に関し、北海道大学工学部土木工学科佐伯浩教授に懇切丁寧なご指導を頂いた。また、低温環境下でのフィールド試験を行なうに当たり、秋田工業高等専門学校榎国夫教授、北海道大学工学部港湾工学研究室の各位に大変お世話になった。紙面を借りて感謝の意を表したい。

<参考文献>

- 1) 中沢直樹, 竹内貴弘, 小野敏行, 佐伯浩: "海洋構造物に作用する氷力式の評価" 海洋開発論文集 Vol.2 (1986年) pp.115~120
- 2) T. Hysing, A. Gran, B. Vaage, S. Skjoldal, F. Korbijin, P.O. Verlo & E. Klausen: "Ice Loads on Marine Structures," Marine Structures and Ships in Ice, Rep., No.79-02 (1979) pp.1~125
- 3) W.F. Weeks, A. Kovacs & W.D. Hilder: "Pressure Ridge Characteristics in the Arctic Coastal Environment" Proc. of POAC (1971) pp.152~183
- 4) A. Kovacs: "Characteristics of Multiyear Pressure Ridges" Prof. of PoAC, Vol.3 (1983) pp.173~182
- 5) T.J.O. Sanderson: "Ice Mechanics-Risks to Offshore Structures" Graham & Trotman (1988)
- 6) M.F. Ashby, A.C. Palmer, M. Thouless, D.J. Goodman, M.W. Howard, S.D. Hallam, S.A.F. Murrell, T.J.O. Sanderson & A.R.S. Ponter: "Nonsimultaneous Failure and Ice Loads on Arctic Structure" Proc. of OTC (1986) pp.399~404
- 7) P.R. Kry: "A Statistical Prediction of Effective Ice Crushing Stresses on Wide Structures" Proc. of IAHR, Part 1 (1978) pp.33~47
- 8) V. Vivatrat & J.R. Kreider: "Ice force prediction using a limit driving force approach" Proc. of OTC (1981) pp.471~485

- 9) K.R. Croasdale, G. Comfort, R. Frederking, B.W. Graham & E.L. Lewis: "A Pilot Experiment to Measure Arctic Pack-Ice Driving Forces" Proc. of POAC (1987) pp.381~395
- 10) S.D. Hallam, N. Jones & M. W. Howard: "The Effect of Subsurface Irregularities on the Strength of Multi-year Ice" Proc. of OMAE, Vol.4 (1987) pp.235~238
- 11) G. Weiss: "Shot Noise Models for the Generation of Synthetic Streamflow Data" Water Resources Research, Vol.13, No.1 (1977) pp.101~108
- 12) B. Michel: "Ice Mechanics" Les presses de l'Universite Laval (1979)
- 13) 佐伯浩, 田中祐人, 小野敏行, 酒井雅史, 尾崎晃: "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 (1983年) pp.653~657
- 14) S. Tanaka, H. Saeki & T. Ono: "The Distribution of Ice Pressure acting on Offshore Pile Structure and the Failure Mechanics of Ice Sheet" Journal of OMAE, Vol.1 (1987) pp.85~92
- 15) N. Nakazawa & S. Sodhi: "Ice Forces on Flat, Vertical Indentors pushed through Floating Ice Sheets" CRREL Special Report, No.90-14 (1990)
- 16) H. Saeki, S. Tanaka & T. Ono: "The Distribution of Ice Pressure on Offshore Pile Structure and the Failure Mechanics of Ice Sheet" Proc. of OTC (1987) pp.349~356
- 17) D.S. Sodhi & C.E. Morris: "Characteristic Frequency of Force Variations in Continuous Crushing of Sheet Ice against Rigid Cylindrical Structures" Journal of Cold Regions Science & Technology Vol.12 (1986) pp.1~12
- 18) 神田徹, 藤田睦博: "水文学—確率論的手法とその応用—" (新体系土木工学26) 技報堂出版, (1982年) pp.1~275
- 19) 竹内貴弘, 田淵浩文, 今泉章, 榎国夫, 岡本智, 佐伯浩: "海氷および淡水氷の強度特性に関する研究" 海洋開発論文集 Vol.8 (1992年) pp.123~127
- 20) G.F.N. Cox, J.A. Richter-Menge, W.F. Weeks, M. Mellor & H. Bosworth: "Mechanical Properties of Multi-year Sea Ice, Phase I: Test Results" CRREL Report, No. 84-9 (1984)

