

ケーソン内凍結に伴う内圧増加の予測法—海水の透水係数—

泉 冽*・奥原信仁**・竹内貴弘***
山下俊彦****・佐伯 浩*****

1. 序

近年、寒地における石油・ガスの採掘装置、地下資源探査装置開発などの研究が米国やソ連、北欧で盛んになされている。しかし、それらの研究の大半は構造物の外部からの永力に関したものである。実際には、建設されている大型可動人工島などのケーソンタイプの構造物はその内部に海水、もしくは海水と砂利の混合物を中詰材とすることが多い。よって、内部の海水の凍結に伴う相変化によってケーソン内の圧力が上昇し、ケーソンにとって危険な状態になることにも注意しなければならない。しかし、内部にどれだけの圧力が生じるか、ほとんどわかっていないために、ポーフォート海などでケーソンの内部をヒーティングして結氷を防いで内圧の上昇を抑えている。このようにヒーティングすることは安全ではあるが、反面、大変不経済なものとなっている。このような事情によりケーソン内の圧力変化を予測する方法が著者らにより研究されてきている。

2. 過去の研究成果

過去に、北海道大学開発科学実験所の低温室内において、鋼製のタンクに淡水、海水もしくは海水と砂利の混合物を入れ、室温 -20°C 、 -30°C のそれぞれにおいて、結氷後、氷厚増加とともに上昇するタンクの内圧の測定を行った。その結果、淡水の場合には時間の経過とともにタンク内の内圧が上昇することが明らかとなった。海水の場合は、時間が経つにつれ氷盤一面に海水が湧き出し、その塩分濃度はしだいに高くなっていった。そして、最終的にタンク内圧の圧力変化の計算法を、次の5つの条件を考慮したモデルから求めたものである。

- 1) 結氷による体積増加
- 2) タンク内圧による側壁の変形
- 3) タンク底板および氷板のたわみ

4) 氷盤とタンク側壁間でのスリップ量

5) 氷盤中を通過した透水量

1)~4)までの条件で計算された結果と実測値との差を5)の条件を含める事により解決しようとしたのである。様々なシミュレーションの結果、内圧予測には、海水の透水係数が最も重要な値であることが明らかとなった。以下に計算モデルに用いた式を示す。

$$P^2 + \left\{ \frac{4E_s h}{D_0^2} \left(D_0 - \alpha E_s h \frac{\Delta H + H_0 - H_i}{\Delta H - H_0 + H_i - 2z} \right) - \frac{D_0^2}{64} \left(\frac{1 - \nu_s^2}{E_s h^3} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i H_i^3} \right) \times \frac{1}{\Delta H - H_0 + H_i - 2z} \right\} \cdot P + \frac{4E_s^2 h^2}{D_0^2} \times \frac{\Delta H - 2z}{\Delta H - H_0 + H_i - 2z} = 0 \quad (1)$$

$$Q = K \cdot \frac{\pi \phi^2}{4} \cdot \frac{P/\omega}{H_i} \cdot t \quad (2)$$

p : 内圧, E_s : タンク側壁鋼のヤング率, D_0 : タンク径, h : タンク肉厚, α : 海水・淡水の圧縮率, ν_i : 氷のポアソン比, ν_s : タンクのポアソン比, ΔH : 海水・淡水の体積増加分, H_0 : タンクの高さ, H_i : 氷厚, E_i : 氷のヤング率, z : スリップ量, K : 透水係数, ω : 液体の単位体積重量, t : 経過時間, Q : 透水量, ϕ : タンク内径

式(1)では、氷盤のたわみ量の計算にあたっては、氷盤を弾性体として扱っている。

さらに窪田¹⁾によって海水の透水係数についての研究が行なわれ、透水係数は海水の塩分濃度と氷温の関数であることが示された。またタンク内の氷盤中の温度分布と塩分量分布がわかりさえすれば図—1の多層モデルを考えることによって各層の塩分量と温度から氷盤全体の鉛直方向の透水係数が次式によって求められることも示された。

$$\frac{L_T}{K_T} = \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \cdots + \frac{L_i}{K_i} + \cdots + \frac{L_n}{K_n} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{K_i} \quad (3)$$

このように海水の透水係数についての研究が行なわれているが、本研究では、それらの結果を踏まえ、さらに

* 正会員 東海大学講師 札幌校舎

** 正会員 札幌市役所 企画調整局計画部

*** 正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所

**** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

***** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

考察・実験を進めた。透水係数の値に関係する温度分布と塩分量分布の形状を任意氷厚において求めることができるようにした。また、実験にあたっては、透水断面積を変化させたり、氷厚、氷温、塩分量、そして海水の透水方向などを変化させて、その透水係数に及ぼす効果を詳細に調べた。

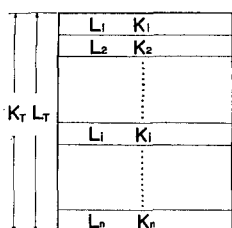


図-1 多層モデル

3. 実験装置と実験方法

透水係数の試験では、定水位透水試験と変水位透水試験などがある。過去に斉藤・小野²⁾が行った実験は後者によるものであった。海水の透水係数を測定するためには、現地の水を取り出さず、海水に浸っている状態で行うのが良い。それら氷層から海水試料を切り出すとブライン（濃縮海水）が流失し、温度分布も変化するので、海水の透水的性質が変化するという問題が生じるからである。しかし、そのままの状態で行うのは困難であるため、気温や海水の塩分量を自由に換えられる室内試験が良いといえる。実験は北海道大学構内開発科学実験所の大型冷凍室で行われた。海水を用いることが困難なことから、塩分量による効果をみるために NaCl 水を用いた。透水断面積の効果を測定するために内径 $\phi=5, 10, 16, 27$ cm のパイプを使用した。また増加するタンク内圧に相当するものとして、コンプレッサーで加圧し、強制的に氷盤中を透水させた。自由に空気圧を変化させることができるよう、コンプレッサーとパイプの間に加圧調整器を用いた。実験器具の構造を図-2に示す。実験は水槽に様々な塩分量をもつ NaCl 水を入れそこに内径 10 cm のパイプを実験の目的に合うよう、深さをあらかじめ決めておいて沈める。また供試体の断面積が透水係数に及ぼす効果をみるために。大型水槽を用い、内径

$\phi=5, 10, 16, 27$ cm のパイプをほぼ 10 cm の深さになるよう沈めた。小型水槽の海水の塩分量は、海水の塩分量と透水係数の関係を見るために、10‰, 20‰, 30‰, 40‰ と変化させた。大型水槽の場合は 30‰ と固定した。室温は氷温を変化させる意味から、 -5°C , -10°C , -20°C とした。以上の条件で氷を成長させ、所定の厚さになった時、パイプを水槽から取り出す。それらのパイプには内部にある厚さの氷が残されているから、そのまま実験に使用する。切り出した氷は、そのまま 1 日ほど放置しておく。これは氷の表面と最下部の温度を等しくさせて温度勾配をなくすためと、余分な海水を除外するためである。また、内部の氷とパイプの内壁の間にすきまがあると、圧力をかけた時、そこから氷が生じ、正確な透水量が測定できないので実験前に 0°C の淡水で断面積に影響を及ぼさない程度にふち止めた。こうしておいた氷の上に着色した灯油を氷と同じ温度に冷やして入れた。これは灯油の粘性係数が海水のそれとほぼ一致することによる。そして図-2に示す器具を用いて圧力をかける。与えた空気圧は 1 本の供試体に対し、 $0.5, 1.5 \text{ kg/cm}^2$ ($0.048, 0.144 \text{ MPa}$) である。こうした加圧によって透過した灯油の量と経過した時間から次式によって透水係数を求める。

$$K = \frac{4}{\pi \phi^2} \cdot \frac{\omega H_i}{P} \cdot \frac{Q}{t} \dots\dots\dots (4)$$

この実験は、窪田によって海水の透水係数を求める際にもダルシー則が成り立っていることが確かめられたことに基づいている。塩分量については、密度測定後、鉛直方向に氷を一樣に切り、融解させて測定した。

4. 実験結果

4.1 透水断面積の効果

過去、小倉³⁾によってタンク内圧増加に関する研究が行なわれ、透水係数の重要性が説明された。さらに窪田によって透水係数についての研究が行なわれた。しかし小倉の使用したタンクは直径 70 cm であり、実際のケーソン構造物などでは、はるかに大きい直径となる。したがって内径 10 cm のパイプで求めた透水係数の値をそのまま大型構造物における透水係数として適当であるのかという問題が生じる。また、実験室などでは先に示した器具を使用するが、その際は内径 10 cm のパイプが使いやすい。そこで 10 cm の径のパイプで求めた透水係数をどのようにして大型構造物における透水係数と結びつけるかについて 4 種類の内径をもつパイプを使用して実験を行なった。実験の結果の 1 例を図-3に示す。

図-3 では各断面積におけるデータの最大値、最小値、平均値を示している。また斉藤・小野によるデータも加えた。図より断面積が大きくなるにつれ透水係数は小さ

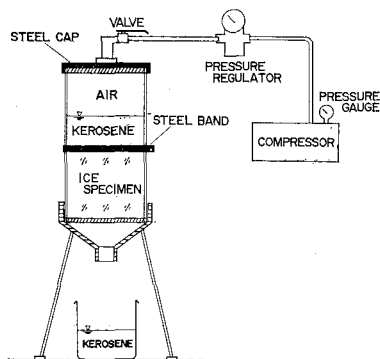


図-2 実験器具の構造

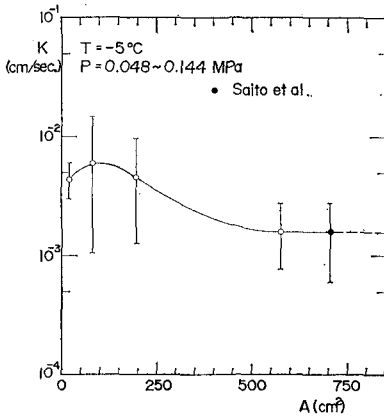


図-3 透水断面積と透水係数の関係

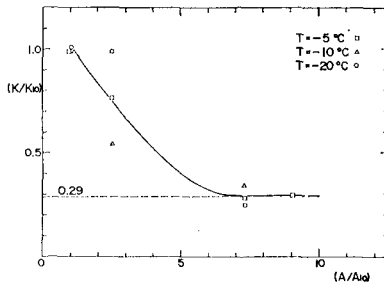


図-4 断面積比と透水係数比

くなり、しかも一定値に近づく。温度が変化してもグラフの曲線形状は同じであるから、各温度におけるデータをまとめたものが図-4である。

A_{10} , K_{10} は内径 10 cm のパイルの断面積と、それにより求めた透水係数を示す。図-4 を使えば、 K_{10} を知ることによって任意の断面積を有する構造物における透水係数を求めることができる。断面積が A_{10} の 7 倍を越えた場合は透水係数は一定になり次式の通りとなる。

$$K = 0.29 \times K_{10} \quad \dots\dots\dots (5)$$

断面積が小さいと透水係数が大きくなるのは、パイルが小さいと内部の氷の成長方向の違いによる結晶同志の界面の存在割合が多くなり、そこから透水するためと思われる。よって断面積が大きくなると界面の効果がなくなり、値が一定に近づく。

4.2 塩分量の効果

海氷は、その内部にブラインを閉じ込めているために非常に多孔質である。また気胞も存在するが、透水する通路としては、そのブライン胞と気胞であると考えられる。つまりブラインの体積を V_B 、空気体積を V_A とすれば、 $(V_A + V_B)$ の量によって透水量が変化するといえる。 V_A , V_B の体積は佐伯⁴⁾により次式とされた。

$$\frac{V_B}{V} = P \cdot S \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\alpha}{T} + 1 \right)^2 \cdot \frac{1}{(1 + \alpha/T) + 0.8} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{V_i}{V} = \frac{\rho}{\rho_i} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{\alpha}{T} + 1 \right) \cdot S \cdot 10^{-3} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{V_A}{V} = 1 - \frac{V_i}{V} - \frac{V_B}{V} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\rho_i = 0.9168 - 0.00014 \cdot T \quad \dots\dots\dots (9)$$

$\alpha = -54.11$ (定数), V_i : 純氷の体積, V : 全体積,

ρ_i : 純氷の密度, T : 氷温

式(6)~(9)により、 $(V_A + V_B)$ の量は、 T , S , ρ の関数であることがわかる。透水係数の値と $(V_A + V_B)/V$ の値の関係については、 $(V_A + V_B)/V$ が増加するにつれ、透水係数の値も大きくなる。この両者の関係において氷温の影響は明確でなく、また式(6)~(9)を使用する際パラメーターが多く使いにくい。したがって、簡単に利用できるグラフを作成するため、ブライン量、空気量を決定する因子である塩分量に着目し、透水係数との関係を調べることにする。その結果を図-5に示す。図-5には、2年分の実験値をプロットしている。この図により、塩分量が多いほど、また氷温が高いほど透水係数が大きくなることが示された。これは式(6)からも明らかのように V_B/V の値、すなわち通路の代表値が増加するためと考えることができる。氷温との関係については、氷温が低下するとブライン中の水分が結氷し純氷の体積に変わり、ブラインの体積は減少し、ブラインの濃度が大きくなるためといえる。図-5 を使用することによって海氷の塩分量と温度の値から内径 10 cm のパイルで求めた透水係数 K_{10} がわかる。 K_{10} については、実際に実験で求めた場合の値と、氷盤の塩分量から図-5 を使って求めた値が存在するが、構造物にとって安全な設計とするためには、小さい方の値を K_{10} とすれば良い。

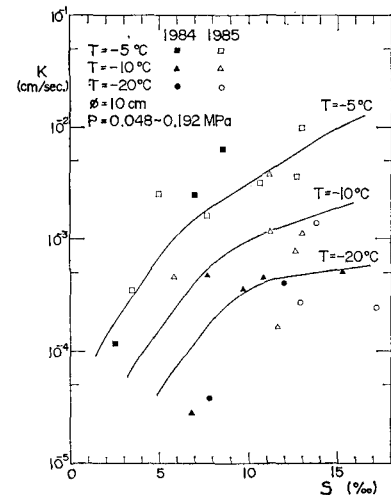


図-5 塩分量、氷温と透水係数の関係

4.3 氷厚の効果

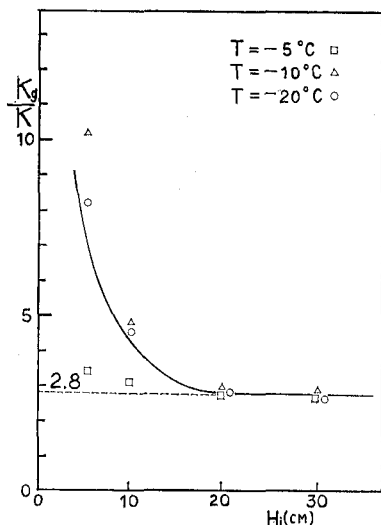
窪田によって氷盤中の塩分量分布、温度分布が求められれば、氷盤全体の透水係数が得られることが示された。よってここでは塩分量分布と温度分布の形状を求め、氷厚によって透水係数がどのように変化するかをみる。まず塩分量分布であるが、長谷美³⁾により、海水は成長に伴い下面で多量のブラインを水中にとりこみ、また厚さの増加に伴って逆に徐々に塩分を失なっていることが明らかにされた。分布を求めるのに、その塩分捕捉量、脱塩量を考えなければならない。捕捉量 S_L は海水の塩分量 S_W と海水の成長速度 (dH_i/dt) より

$$S_L = \{A \cdot (dH_i/dt) + B\} \cdot S_W \quad \dots\dots\dots (10)$$

とされる。A, B は定数で 1.11, 0.22 とする。成長速度については、氷厚の時間変化が小倉によって求められているのでその結果を利用する。脱塩量は海水と氷との密度差 $\Delta\rho$ から次式により求める。

$$S(T'') = S(T') \cdot \left(\frac{T''}{T'} \right)^{\Delta\rho/(1-\Delta\rho)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

T' , T'' は成長時の 2 つの引き続く段階での同じ場所の氷の温度で、 $S(T')$ と $S(T'')$ はそれぞれ対応する塩分量である。温度が T' から T'' に下がると $S(T')$ から $S(T'')$ に減少する。式 (10), (11) 及び氷盤中の上層で脱塩した塩分が下層にたまる量も考慮して塩分量分布を求めた。こうして求めた塩分量分布は実際の塩分量分布と比較して、ほぼ一致している。次に温度分布であるが、窪田によって氷盤の鉛直方向の温度分布は直線で近似されることが示されている。また、実験値も直線分布となったことから、温度分布は表面温度と最下面の温度、つまり結氷温度である -1.7°C との直線分布とする。なお表面温度については、気温との関係において時間変化が小倉によって求められている。これで塩分量分布と



図—6 氷厚と透水係数の関係

温度分布が求められたので、任意氷厚における氷盤の透水係数が式(3)を使うことによって得られることになる。さて、実験で透水係数を求める際は、余分な海水を除外するために1日ほど放置しておくが、そのため水中の温度分布が変化し、温度勾配がなくなる。しかし実際の構造物中の氷盤には当然、温度勾配があるのだから実験で求めた透水係数 K を、温度勾配がある氷盤の透水係数 K_g に補正しなければならない。 K と K_g について永厚との関係を示したのが図—6である。

図—6 を見てわかるように永厚が 20 cm を越えると K_g/K の値は、ほぼ一定となり次式が成立する。

$$K_g = 2.8 \times K \quad \dots\dots\dots (12)$$

4.4 透水方向による効果

今までは氷の成長方向と同方向の透水性を考えてきた。それは氷の供試体を作成したあと、簡単に実験が行なえるという理由からであった。しかし実際の構造物中の氷盤においては、海水は氷の成長方向と逆方向に透水する。よって透水方向の違いによる透水係数の変化をとらえることが必要になってくる。ここでは供試体を作成する際パイルの底が水面と合うよう水槽に沈め、氷を成長させた。そのあとは今まで通りの実験を行なった。過去に斉藤・小野によってブライン排水路の鉛直分布が示され表面から深くなるにつれて排水路の断面積が大きくなっていくことがわかった。よって成長方向と逆方向の透水性の方が大きいと思われる。成長方向と同方向の透水係数を K 、逆方向の透水係数を K_r として実験結果を表—1に示す。

表—1 透水方向と透水係数の関係

S=30% $\phi=10\text{ cm}$ $P=1.5\text{ kg/cm}^2$			
No.	K (cm/sec)	No.	K_r (cm/sec)
1	6.1×10^{-5}	1	3.0×10^{-4}
2	3.8×10^{-4}	2	5.1×10^{-4}
3	6.7×10^{-5}	3	5.0×10^{-4}
$\bar{K}$	1.7×10^{-4}	$\bar{K}_r$	4.4×10^{-4}

表—1 から K_r 、つまり逆方向の透水係数は、同方向の透水係数 K のほぼ 2.6 倍になっていることがわかる。よって次式が成立する。

$$K_r = 2.6 \times K \quad \dots\dots\dots (13)$$

4.5 大型構造物中の透水係数

透水係数への様々な効果を考えてきたが、これで実際の構造物中における氷盤の透水係数を求めることができる。断面積が 550 cm^2 を越えた場合、実験、または図—5 を用いて求めた透水係数を K_{10} とすると実際の氷盤の透水係数 K は次のように求められる。

$$K = 0.29 \times 2.8 \times 2.6 \times K_{10} = 2.1 \times K_{10} \quad \dots\dots (14)$$

5. 結 論

- 1) ケーソン構造物中において上部空間を設けることにより氷盤のたわみ、透水が可能になり、ケーソン構造物中の内圧上昇を抑えることができる。
- 2) 実氷盤の透水係数を求めるには、多層モデルを用い、その氷盤中の塩分量分布・温度分布を推定することにより任意氷厚における透水係数を得ることができる。
- 3) 透水係数はケーソン構造物の断面積の大きさによって変化する。断面積が大きくなるにつれて透水係数は小さくなるが、やがて一定値に近づく。特に断面積が 550 cm^2 を越えた場合は、内径 10 cm のパイルで求めた透水係数の値の 0.29 倍になる。
- 4) 海氷中の塩分量が多いほど、また氷温が高いほど透水係数は大きくなり、そのダイアグラムを求めた。
- 5) 塩分量分布はほぼ一定の値となり、温度分布は表面温度と最下面の温度とを結ぶ直線分布となる。
- 6) 実氷盤で温度勾配がある場合は、ない場合と比較して、氷厚が 20 cm を越えれば透水係数は 2.8 倍となっている。
- 7) 氷の成長方向と逆方向の透水係数は、同方向の透水係数の 2.6 倍となる。
- 8) 実験室内で内径 10 cm のパイルを使って透水係数を求めた場合は、断面積の効果、温度勾配と氷厚の効果、透水方向の効果を考慮して透水係数を補正する。塩分

量分布と温度分布から氷盤の透水係数を求めた場合、断面積の効果と透水方向の効果を考慮して補正する。補正された透水係数を使うことで、式 (1), (2) よりタンク内圧を求めることができる。

6. 後 記

本研究を行うにあたって、北海道大学工学部土木工学科港湾工学講座の小野敏行氏、元北海道大学工学部学生梶谷哲彦氏に大変お世話になった。ここに深い謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Kubota, F., H. Saeki, T. Takeuchi and N. Igarashi: Experimental Study on Permeability Coefficient of Sea Ice, Proc. of 10th Ocean Development Symposium, Tokyo, pp. 74~77, 1985.
- 2) Saito, T. and N. Ono: Percolation of Sea Ice 1—Measurements of Kerosene Permeability of NaCl Ice—, Low Temperature Science, Ser. A, 37, pp. 55~62, 1978.
- 3) Ogura, S., H. Saeki, K. Izumi and M. Sakai: Estimation of Internal Pressure due to a Growth of Ice Thickness in a Caisson, Proc. of IAHR Ice Symposium, Hamburg, pp. 97~109, 1984.
- 4) Saeki, H., T. Ono, A. Ozaki and S. Abe: Estimation of Sea Ice Forces on Pile Structures, Proc. of IAHR Symposium on Ice Problems, Part 1, pp. 465~478, 1978.
- 5) Hasemi, T.: On the Growth of thin Winter Ice, Low Temperature Science, Ser. A, 32, pp. 207~218, 1974.