

「海水の透水係数に関する研究」

北海道大学	正 員	佐 伯 浩
北海道大学	学正員	竹 内 貴 弘
三井海洋開発株式会社		窪 田 太 一
水資源開発公団		五 十 嵐 昇

1. 研究目的

最近、酷寒の地域である北極圏、南極圏あるいはそれに近い地域が、石油、ガス等の資源開発を目的として注目され、資源の探査や掘削のための構造物の建設が急務とされている。この構造物が建設される場所がただの海洋ではなく氷海域という特殊な地域であるために、構造物の設計に関しては、海水との相互作用を考慮せねばならない。実際に、北極海やサハリン北部、渤海などの海洋に建設が計画されている大型コンクリートケーソンタイプの構造物は、その内部に海水、あるいは海水と砂利の混合物を注入する事が多い。このような構造物を設計するにあたり、外部の水力はもとより、内部の海水の結氷によって体積増加が起り、そのためにケーソン内部の圧力上昇に注意しなければならぬ。過去に北海道の網走、宇登呂港のケーソンが破壊した例が報告されている。この原因も、ケーソン内部の海水の結氷により内部の体積増加が起りそれによって内圧上昇が引き起され破壊をもたらしたと推測されている。このような、被害を防ぐためには、構造物内部に温水パイプを通して熱によって海水を結氷させないようにする事が可能だが、大変不経済である。このような事情を考慮して、以前から著者らの研究室において「氷圧増加に伴うケーソン内圧増加の予測法」について系統的な研究を行ってきた。この場合、内圧増加の予測に必要な因子はいろいろあるが、中でも海水の透水係数が最も重要な値である事が明らかとなり、その正確な値を見積ることが大切である。逆に云うと、海水の透水係数の値が与えられれば、以前の著者らの研究結果を利用する事によって、ケーソン内圧を予測することも可能となる。以上により、本研究は海水の透水係数の正確な値を求めることを目的に、それに影響を与えるさまざまな因子を取り上げ、その中で最も強く作用している因子を見つけ出し、最終的に海岸・海洋構造物の設計に役立てることを第一の目的とした。次に、海水が結氷する時に積雪があると、これが荷重となって海水下の海水が湧き出して、それが再び凍ることによって氷厚増加に影響を及ぼす。設計にとって氷厚は重要なパラメータであるので、この値と密接な関係のある海水の透水係数の値とそのメカニズムを解明することを第二の目的とした。また、過去のPounder, Littleや斉藤、小野らの実験結果と比較し検討を加える事にした。

2. 過去の研究結果

以前に、北海道大学開発科学研究所の低温室において、タンクに淡水、海水あるいは海水と砂利を入れ、室温-20℃、-30℃のそれぞれにおいて、氷厚増加に伴って変化するタンク内圧の測定実験を行った。その結果、淡水の場合は氷盤にクラックが入り、時間の経過とともに透水係数は小さくなり、タンク内の内圧が上昇することが明らかとなった。海水の場合は氷盤にはクラックが発生せず、氷盤表面は氷片と海水の混合状態となり、その塩分濃度は時間の経過とともに高くなることが分った。そして、最終的にタンク内圧の変化の計算法を、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氷板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。この透水量から透水係数を推定し、過去のPounder, 斉藤らの結果と比較すると非常に良い一致を示した。以下に計算モデルに用いた式を示すと、

$$P^2 + \frac{4Esh}{Do^2} Do^2 - \alpha Esh \frac{\Delta H + Ho - Hi}{\Delta H - Ho + Hi - 2z} - \frac{Do^2}{64} \frac{1 - Vs^2}{Esh^3} + \frac{1 - Vi^2}{EiHi^3} \times \frac{1}{\Delta H - Ho + Hi - 2z} \times P + \frac{4Es^2h^2}{Do^2} \times \frac{\Delta H - 2z}{\Delta H - Ho + Hi - 2z} = 0 \quad (1)$$

$$Q = K \times \frac{\pi Do^2}{4} \times \frac{P/w}{Hi} \times t \quad (2)$$

P : 内圧 Es : 鋼のヤング率 Do : タンク径 h : タンク肉厚 α : 海水、淡水の圧縮率 Vi : 氷のポアソン比 Vs : タンクのポアソン比 ΔH : 海水、淡水の体積増加分 Ho : タンクの高さ Hi : 氷厚 Ei : 氷のヤング率 z : スリップ量、時間に比例して増加 K : 透水係数 w : 液体の単位体積重量 t : 時間 Q : 透水量

この2式に、 P と t の回帰式、 Hi と t の回帰式を用いることによって K の値を求めることが過去に行われたが、今回の研究は逆に、 K の値をあたえることによって P を推定することを考える。したがって、正確な K の値についての研究が是非とも必要となってくる。

3. 海水の透水係数の実験装置と方法

透水係数を求めるための試験には、土の場合だと室内の低水位透水試験と変水位透水試験とがあって、前者は透水性の良い材料に用い、後者は悪い材料に適する。過去に、斉藤、小野らが行った実験は後者の変水位によるものであった。また、道路の一般的な材料のアスファルト混合物の透水試験には、室内用の水圧方式と現場用のカリフォルニア法や道路公団法がある。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が、これを実際に行うのは困難である。そこで、透水係数に影響を与える因子を見つけ出す目的から考えて、温度や海水の塩分濃度を自由に換えられる室内試験が良いといえる。また、タンク内の海水の透水係数の値を求める目的からして、内圧を自由に選定できる水圧方式を採用した。実際にかけた圧は、以前のタンクの実験で測定した内圧を目やすに行った。次に、実験方法を示す。fig-1 に示す水槽にそれぞれ、10%, 20%, 33%の塩分濃度をもつNaCl水を入れて、そこへ内径10cm, 高さ30cm, 厚さ1cmの透明アクリル製の円筒を水面から5cm, 10cm, 15cmの深さまで入れて水平になるように吊す。こうした状態のまま、低温室内を-8℃, -10℃, -20℃それぞれの条件下で凍らせ、成長した氷が最低20cm以上の厚さになるときに氷供試体を含む円筒アクリル容器を取り出し、これらを温度勾配を一定にする目的から放置しておく。また海水の塩分量S(%)と密度 ρ (g/cm³)を測定するために一つの容器はダミーとして用いた。この供試体中を氷と同温度の着色した灯油(メチルレッドにより着色)を通過させた。灯油を用いたのは、塩水の粘性係数の値とほぼ同じであり、低温で凍らないからである。着色した理由は、氷と容器の間での透水を目視により防ぐことと、透水するようすを観察するためである。アクリル円筒は内圧による変形を抑えるため、1cm厚とし、海水部は外側からスチールバンドでしめつけ、供試体とアクリル境界からの漏れを防いだ。fig-2 がその実験装置であって、COMPRESSORで加圧した空気をPRESSURE REGULATORを通して圧を選定できるようにして行った。一本の供試体に対しては、圧力 P を0.5, 1.0, 1.5, 2.0(kg/cm²)で加圧し、通過量 Q (cm³)、測定時間 t (sec)、灯油の単位体積重量 w (gr/cm³)、供試体厚さ L (cm)、断面積 A ($\frac{\pi}{4}$

$\times 10^2$ cm²)、から透水係数 K (cm/sec)を求める。

(2) 式と同様な連続の式とダルシーの式を変形し、

$$K = \frac{1}{A} \cdot \frac{WL}{P} \cdot \frac{Q}{t} \quad (3)$$

実験は、先にも述べた状態で作製した供試体を用い、温度 $T = -8, -10, -20^\circ\text{C}$ で行った。ここで、灯油の高さによって生じる圧力は、非常に小さいために無視することにした。また、NaCl氷と比較する意味からも、サロマ湖の海水を用いて同様の実験を行った。この時の気温は-6℃であった。まず、予備実験の意味からも、供試体の再現性についての確認を行った。すなわち、一本の供試体について順に圧を変化させた。0.5 → 1.0 → 1.5(kg/cm²)と1.0 → 1.5 → 0.5(kg/cm²)と1.5 → 1.0 → 0.5(kg/cm²)のように変

化させた訳であるが、同一の供試体については同じ K 値を示すことが確認された。ただし、氷は結晶体であり、はがれ易いこともあるために、一本について多数実験を行えば K の値にも変化は表われるであろう。以上を確認したうえで、海水の物理的性質を考慮し、海水を構成する純水、ブライン、空気量のうち何が透水係数に最も影響を及ぼすかを明らかにしたい訳であるが、これらを実際に測定するのは困難である。したがって、われわれが人為的に変えられる量、すなわち氷温 T 、密度 ρ 、NaCl水の塩分量、圧力 P を調節し、透水係数との関係を明らかにする。

4. 測定結果と考察

一般に多孔体中を水や空気のような流体が移動する場合は、①表面張力による流れ②濃度拡散による流れ③圧力勾配による流れがある。このうち、著者らが扱ったものは③の圧力勾配による流れであって、この流れは内管内の流れに類似しており多孔体中の流れを細い円管内の流れの集合と考えることによって導かれる式がダルシーの式と呼ばれるものである。ダルシーの実験式は、砂層中を浸透流が通過する場合において導かれ、層流域にお

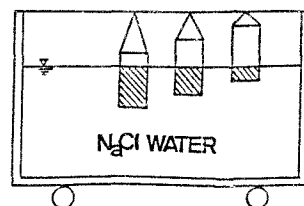
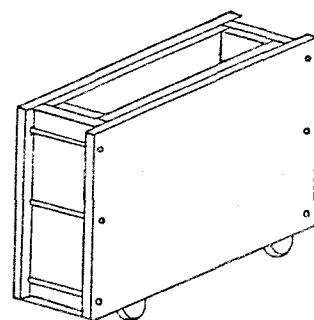


fig-1

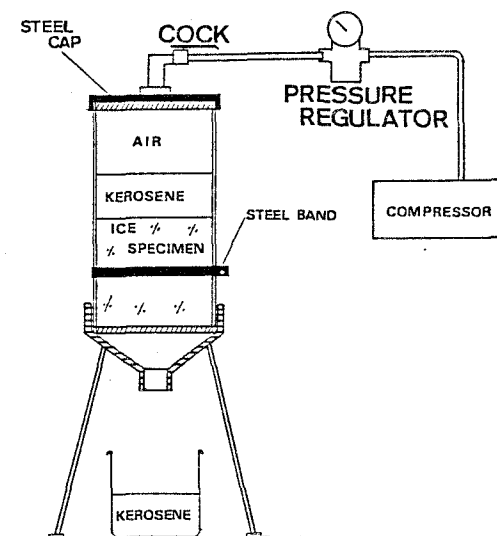


fig-2

いて適用される。(2),(3)式はダルシー式が成立することを前提としている。そこで、予備実験としてダルシー式を満足することを確かめた。fig-3は横軸に動水勾配Iを、縦軸に浸透流の速度V(cm/sec)をとって、それぞれ供試体の厚さLごとに直線関係が示されている。すなわち、 $V=K \times I$ が成立しダルシー則を満足している。fig-4も、時間の経過に伴って透水量が一定、すなわち透水係数が一定ということを表わしている。以上の結果をもとにダルシー則を海水中の流れに適用して考えてみると、一般に海水は純水、ブライン、空気より構成されており、多孔体の中の円管に相当するものは、ブラインと空気と判断される。したがってブライン体積 V_B 、空気体積 V_A の和(V_A+V_B)が通路と考えるべきである。過去に、佐伯らが求めた V_A 、 V_B についての式を次に示す。

$$V_B/V = \rho \cdot S \cdot 10^{-3} \left(\frac{\alpha}{T} + 1 \right)^2 \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha}{T} \right) + 0.8} \quad (4)$$

$$V_i/V = \frac{\rho}{\rho_i} \left\{ 1 - \frac{\alpha}{T} + 1 \cdot S \cdot 10^{-3} \right\} \quad (5)$$

$$V_A/V = 1 - V_i/V - V_B/V \quad (6)$$

$$\rho_i = 0.91880 - 0.00014 \cdot T \quad (7)$$

α : -54.11 (定数) V_i : 純水の体積 V : 全体積

ρ_i : 純水の密度

(4) ~ (7) 式によって、 V_A と V_B は T, S, ρ の関数であることが示され、通路の大きさを代表すると考えられる(V_A+V_B)/ V の量は、水温、塩分量、密度のそれぞれの値によって変化することがわかる。fig-5 ~ 7は、横軸に(V_A+V_B)/ V 、縦軸に透水係数 K をとってその関係を各氷温ごとに比較したグラフである。当然の結果として、(V_A+V_B)/ V の増加にしたがって透水係数の値も増加し、片対数グラフ上で直線関係がある。また、fig-5 ~ 7を重ねることによって氷温の違いには無関係であることもわかる。これらのことから、(V_A+V_B)/ V が通路であることが強く裏づけられる。一般に、海水の組成は複雑であって典型的な不均一物質であるために、はっきりした通路を実際に観察することができないが、それを代表する値として(V_A+V_B)/ V で示すことが良いと考えられる。また、著者らの実験は、供試体を氷層から切り出し、温度勾配を一定にするためにある時間放置したのでブラインの流出が当然考えられる。したがって、この分を空気量と考える理由からも(V_A+V_B)/ V という値を用いて比較した。次に、fig-8は、横軸に海水が取り込んだ塩分量 S を、縦軸に透水係数を示す。グラフより、それぞれの氷温に応じて片対数グラフ上では直線関係が示されることが明らかとなった。すなわち、氷温が一定の時は、塩分量 S が増加するにつれて透水係数の値も

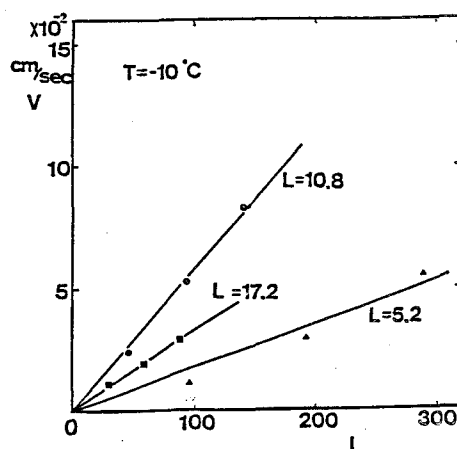


fig-3

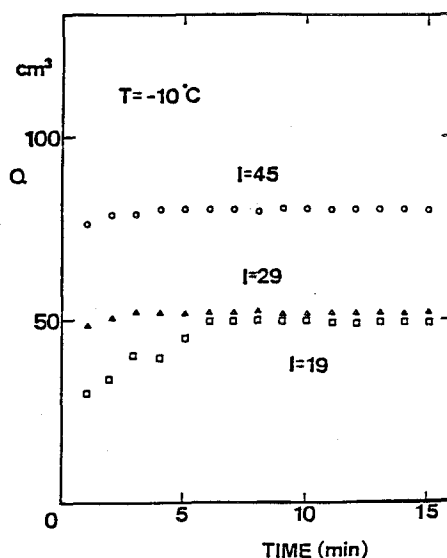


fig-4

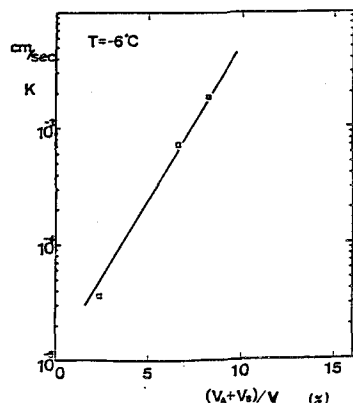


fig-5

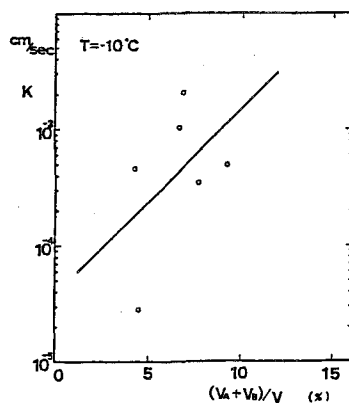


fig-6

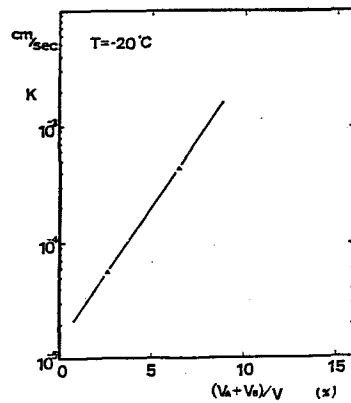


fig-7

増加する。これは、(4) 式からも明らかなように、 V_B/V の値が増加する、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。しかし、氷温の関係ははいってくると多少複雑となる。また、グラフ上のある塩分量の値を考えると、その時の透水係数は氷温の値によって違い、氷温が低い程小さい。これは(4),(5)からも明らかなように氷温 T が低下すると、 V_B/V の値が小さくなり、 V_i/V の値は大きくなるため考えられる。換言すれば、ブライン中の水分が結氷し純水の体積に加わり、ブラインの体積は減少しブラインの濃度が大きくなると考えられる。次に、密度 P との関係を考えて、今回の実験で測定した値は $0.9 \sim 0.935 \text{ g/cm}^3$ と範囲が非常に狭く、その値のみによって透水係数と比較することはできないが、(4),(5)式において含まれているために無視することは出来ない。ブライン密度 ρ_B は

$$\rho_B = 1 + 0.8 \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{T}} \quad (8)$$

水の密度 ρ_i は 1.00 g/cm^3 、塩類の密度 ρ_s は 2.17 g/cm^3 、で(7)の ρ_i を合わせて考えてみても、氷温の変化によってそれぞれの密度の変化は僅かとなり全体の密度 ρ への影響は少なしたがって、直接的な透水係数との関係を考えるのは危険である。

5. ケーソン構造物への応用

海水の透水係数は、主に海水が捕捉している塩分量と氷温に影響をうけることが実験結果から示された訳だが、この結果を実際のケーソン構造物へ適用することを考える。fig-9に示すように、全氷厚 L_T の海水の透水係数 K_T を求めるには、氷の全体を成長方向に $L_1, L_2 \dots L_i \dots L_n$ と n 分割し、それぞれの透水係数を順に $K_1, K_2 \dots K_i \dots K_n$ とすると、多層系の透水モデルの式から、

$$\frac{L_T}{K_T} = \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \dots + \frac{L_i}{K_i} + \dots + \frac{L_n}{K_n} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{K_i} \quad (9)$$

で示される。次に、 K_i は、第 i 層の塩分量 S_i と氷温 T_i が与えられるとfig-8から推定することが出来る。以上から、室温 -30°C の場合のタンクの実験を例にとって、実際に測定された最後の時間 $T=160$ 時間後を今考えると、氷厚は約38cm、また過去の佐伯らの研究から氷盤表面の温度は -27°C と推定される。氷盤下面は -1.7°C であり、Michelの研究から氷盤の鉛直方向の温度分布は直線で近似されることを利用すると、任意の深さの氷温の概略値は求める事が出来る。今、氷盤を鉛直下方へ $0 \sim 12 \text{ cm}, 12 \sim 24 \text{ cm}, 24 \sim 38 \text{ cm}$ の3層に分割し、それぞれの温度の平均値 $21^\circ\text{C}, 12.7^\circ\text{C}, 2.1^\circ\text{C}$ を用いる。塩分量分布は、長谷美、佐伯らの研究から氷厚が30cmぐらいまではその分布は一定に近く、今計算のために $S=10\%$ を用いて(9)式から計算すると $K_T=3.28 \times 10^{-4}$ となり、以前にタンクモデルから求めた $9.0 \times 10^{-4} \sim 8.7 \times 10^{-3}$ と比較すると、近い値ではあるがきびしい値となり安全側の値となった。この理由は、正確な塩分量分布を求めていることが考えられ、また、氷盤最大ではブライン取り込みが行われた直後であるために、上方よりはかなり塩分量が大きいことを考慮すべきである。また、fig-8において、別の氷温のデータがあると計算値も変わってくるであろう。以上、順を追って K の値を見積る方法を述べたが、氷盤を分割する数を多くすることによって、もっと正確な K 値を推定できるであろう。しかし、何よりも一番大切なことは、時間によって変化している塩分量と氷温の正確な分布を測定する事である。換言すれば、正確な透水係数の値は、正確な塩分量分布、氷温分布を推定する事であると思われる。

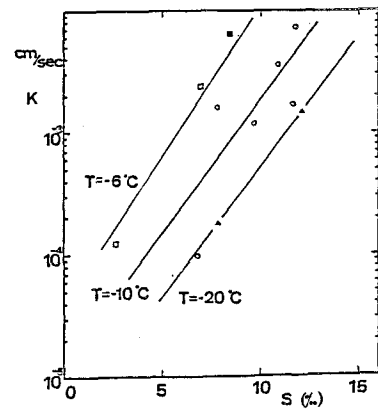


fig-8

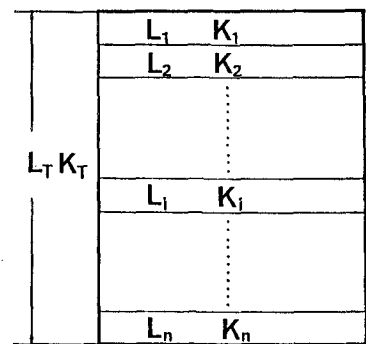


fig-9

(参考文献)

- 1) 佐伯、泉、小倉、酒井、尾崎：氷厚増加に伴うケーソン内の水圧変化の予測法について、第30回海岸工学講演会論文集p54～58,1983
- 2) Hasemi,T: On the Growth of thin Winter Ice,Low Temperature Science, SerA,32,PP.207～208,1974
- 3) Saito,T.and N.Ono: Percolation of Sea Ice I -Ice-, Low Temperature Science, Ser.A,37,PP.55～62, 1978
- 4) Pounder,E.R.and E.M.Little:Some Physical Properties of Sea Ice, I, Canadian Jour. of Physics, 37, PP. 443～473,1959
- 5) 近藤連一著：多孔材料、技報堂出版