

砂及び砂利を含んだ海水の透水係数に関する研究

村木 義男* ・ 角原 英人**・ 後藤 克人***
山下 俊彦****・ 佐伯 浩*****

1. ま え が き

寒冷地の海岸、海洋にケーソン型の構造物を建設する場合、ケーソン中詰材の凍結に充分注意を払わねばならない。重力式の構造物の場合、ケーソン内部に海水あるいは海水と土砂を重量増加のため充填する。この時、寒さのため内部の海水が結氷すると、その相変化に伴う体積増加が起こるが、結氷が表面から始まるため、内部の圧力の逃げ場がないため内圧が増加する事になる。この内圧の増加によりコンクリート製ケーソンの破壊の例として、1961年から1962年にかけて、北海道のオホーツク海に面した網走港の防波護岸や宇登呂港の防波堤ケーソンの破壊がある。最近、比較的未開拓の地域であった渤海、オホーツク海北部海域それに北極海等寒冷地の海岸、海洋における石油、ガスの掘削の必要に迫られてきているが、この海域では気温が非常に低下するため寒冷地特有の技術的諸問題の解決と同時に新しい技術の開発が望まれている。現在、北極海で建設されているケーソンタイプの重力式構造物においては、移動の利便性と内圧予測の手法が確立していなかったことから内部をヒータリングして中詰材の凍結を防いでいるのが現状である。著者等は、過去に中詰材として海水を用いた場合のケーソン内圧増加の予測手法と海水の透水係数に関する研究を進めてきたが、本研究は特に、砂利及び砂を含んだ海水の透水係数に関する系統的な実験を行った結果を報告するものである。

2. 今までの研究成果

著者の一人、佐伯は低温室内において、鋼製タンクに海水、淡水それに海水と小砂利を入れた3種類の凍結実験を行ない、氷圧、内圧、氷盤の撓み、タンクの変形、それに、氷盤を通して透水した液体の量の変化を詳細に調べている。その実験をとおして、以下の条件が求められればケーソン内圧の予測が可能となる事を明らかにし

た。

- 1) 氷厚の時間変化と氷盤の弾性諸定数
- 2) ケーソン内圧による構造物壁体の変形量
- 3) ケーソン底板および氷盤のたわみ変形量
- 4) 氷盤とケーソン内壁間の凍着強度及びスリップ量
- 5) 氷盤の透水係数

いくつかのシミュレーションの結果、内圧予測の計算には、氷盤の透水係数が最も重要であることを明らかにした。以下、円断面ケーソンの場合の計算モデルに用いた式を示す。

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

$$Q = K \cdot \frac{\pi D_0^3}{4} \cdot \frac{P/\omega}{H_i} \cdot \Delta t \dots\dots\dots (2)$$

P: 内圧, E_s : ケーソン側壁のヤング率, D_0 : ケーソン内径, h : ケーソン側壁厚, α : 海水の圧縮率, ν_i : 砂混入氷のポアソン比, ν_s : ケーソン構造材のポアソン比, ΔH : 砂混入氷の Δt 時間の氷圧増加量, H_0 : ケーソンの中の水深, H_i : 氷厚, E_i : 砂混入氷のヤング率, z : スリップ量, K : 砂混入氷の透水係数, Q : Δt 時間の透水量, ω : 液体の単位体積重量

3. 実験装置と実験方法

透水係数の実験に用いる供試体の作製は、基本的には過去に報告した海水の透水係数の実験方法と同じであるが、今回は、砂及び砂利を用いるため、内径 10 cm のアクリル円筒 (肉厚 10 mm) の底に、内部の砂が抜けないように、サラン布を敷き、それを 5 mm メッシュの金網で押えつけて供試体を作製した。底に布を用いたのは、結氷する時、海水中のブラインが排出されるので、それを妨げないようにしたためである。その他の供試体作製方法は前報と同じである。本研究においては、砂および砂利を含んだ海水の透水係数の研究を目的としてい

* 正会員 工博 北海道工業大学教授 土木工学科

** 正会員 北海道庁旭川土木現業所

*** 学生員 北海道大学大学院工学研究科

**** 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

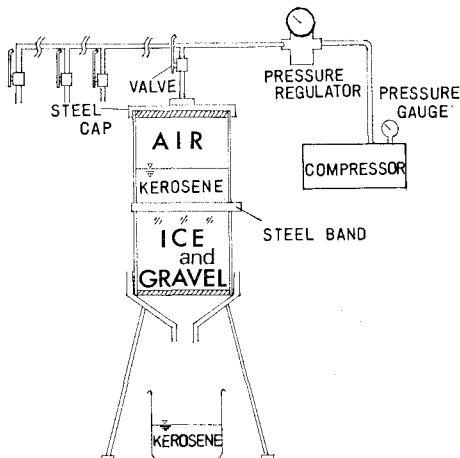
表—1 実験材料の諸元

諸元 実験材料	粒径の範囲 (mm)	平均粒径 (mm)	単位体積重量 (grf/cm ³)	平均空隙率 (%)
No. 1	0.125 ~ 0.25	0.188	2.71	45.4
No. 2	0.50 ~ 2.28	1.390	2.69	42.6
No. 3	3.36 ~ 5.0	4.18	2.62	40.9
No. 4	20.0 ~ 30.0	26.40	2.75	45.2

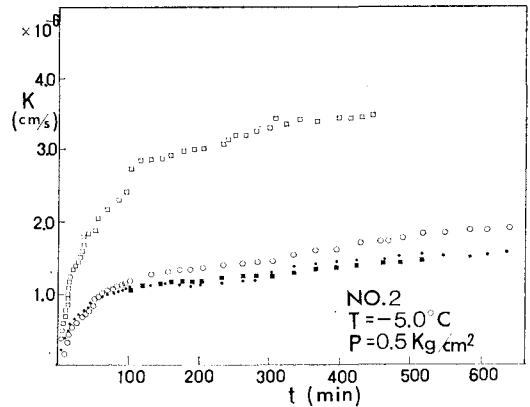
るので、特に砂の粒径を変えて実験を行った。用いた砂の種類は表に示すように4種類で、No. 1 が一番小さな粒径で、No. 4 が最も大きい粒径である。また砂をアクリル製円筒に充填した時の空隙率は、砂の平均粒径に関係なく 40.9~45.4% の範囲であった。また、氷中の塩分量は実氷の充分成長した状態では 3~7‰ であるので、その程度の塩分量になるように海水の塩分量を10‰ とした。海水の塩分量は 3~5‰ であったので、実際の海水とはほぼ同じ性質を有しているものと考えられる。実験装置は図—1 に示す。透水させる液体は、海水とはほぼ同一の粘性係数であるケロシンを用いた。また、砂および砂利を含んだ海水の透水係数は長時間の試験が必要であるためと、実験データの分散が大きい事が予想されるため、同一の圧力で4本の供試体の試験ができるように改良された。透水係数が小さいため、一定の透水係数になるまでに長時間を要するので、実験時間を600~720分とし、透水係数は5分の流出量から計算した。透水係数 K は、(2) 式を変形した次式を用いて計算した。

$$K = \frac{4}{\pi \phi^2} \cdot \frac{\omega H}{P} \cdot \frac{Q}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここでは、 ϕ アクリル円筒の内径、 ω はケロシンの単位体積重量、 Δt は計測時間、 Q は Δt 時間に流出してくる流量である。また P は内圧である。前述したように、測定時間 Δt は5分間で、測定時間間隔は、透水係数の変化の激しい実験初期は5分毎に試験し、変化の少ない



図—1 透水試験の実験装置



図—2 透水係数の時間変化と分散

時は30分毎程度とした。また、透水液の中には、ケロシンだけでなく、海水中に含まれるブラインも排出してくるため、最終的にはブラインとケロシンを分離して透水量を測定した。また、ケロシンとブラインの分離を容易にするために、ケロシンにヨウ素で着色した。また、実験データに分散が大きい事が予想されたので、各ケース4~5個の供試体で試験を行った。また設定圧力は、 $P=0.25, 0.5, 1.0, 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ として実験を行った。また、氷温 T は -5°C とした。

4. 実験結果と考察

過去の海水の透水試験の結果から、海水中を流れる流体はダルシー則をほぼ完全に満足していることが明らかとなっている。図—2 に氷温 $T=-5^\circ\text{C}$ 、圧力 $P=0.5 \text{ kg/cm}^2$ で No. 2 の砂を含んだ海水の透水係数 K と経過時間 t の関係を示す。4 個の供試体を同一の実験条件で試験を行ったものであるが、一つの供試体の透水係数は他の三つに較べて大きな値を示している。海水のみの場合の透水係数に較べて分散が大きい結果となっているが、これはアクリル円筒内面が砂あるいは砂利と接している部分があるため、内壁にそって水みちが出来るためと考えられる。また、透水係数が一定値になるのに500分以上要する事がわかる。一般に海水のみの場合、図—3 に示すように透水係数は氷温と海水中の空隙率（全体積 V に対する気泡 V_A とブライン V_B の体積の和の比） $(V_A+V_B)/V$ に依存していて、氷温 -5°C の場合、透水係数 K は、 $10^{-5} < K < 10^{-2} \text{ cm/s}$ の範囲であるが、砂を含んだ海水の場合は、図—2 に示すように、 10^{-6} cm/s のオーダーと小さいため、一定の透水係数になるのに長時間を要することになる。一般に海水の場合は試験開始後5~20分程度ではほぼ一定の透水係数を示すことから、砂まじりの海水の透水係数が一定値になるまでに長時間を要する理由は他の理由にもよると考えられる。図—4 に No. 2 の砂を含んだ海水の透水係数及

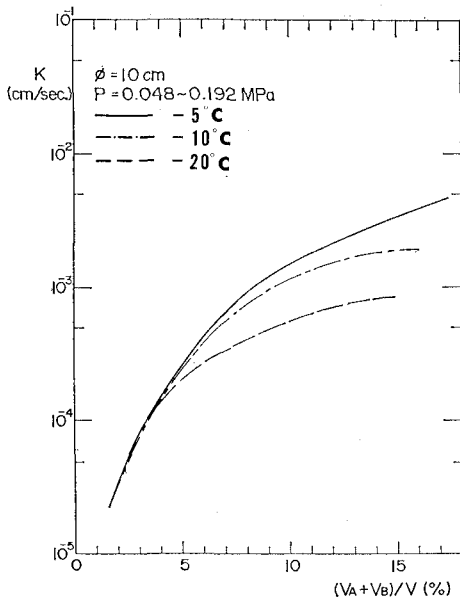


図-3 海水の場合の空隙率と透水係数の関係

び流出ブライン流量と経過時間 t の関係を示す。流出ブライン流量 Q_s は、排出してきたケロシンとブラインからケロシンを分離したものであるが、この場合、透水係数は約 300 分経過後から一定値を示しているのに対し、ブラインの流量は 30 分経過後に最大流量を示し、その後は時間の経過とともに急激に減少していき、約 360 分後にはほぼゼロとなる。この事実は、透水係数の試験をするに当たって、砂まじりの海水の場合、海水のみの場合と違って、時間の経過とともに新しい水みちが形成されている可能性を暗示している。これを裏づけるものとして海水のみの場合は、同じ $P=0.5 \text{ kg/cm}^2$ で $T=-20^\circ\text{C}$ と低温の場合においても、最初の 3 分でブライン流出量 Q_s が最大となり、約 6 分後には Q_s は完全にゼロとなり、透水係数 K も約 6 分経過以降は一定値を示しているということである。透水係数が一定を示すという事実は、透水する水みちが安定していることを示しているのに対して、長時間経過後も透水係数が増加

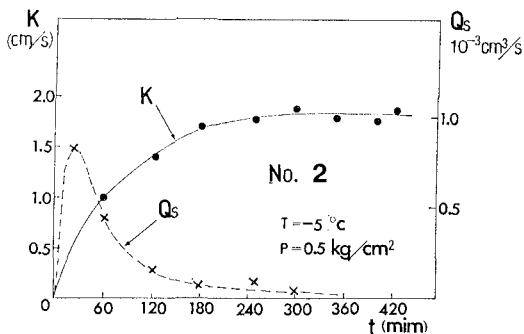


図-4 経過時間に対する透水係数とブライン流量の関係

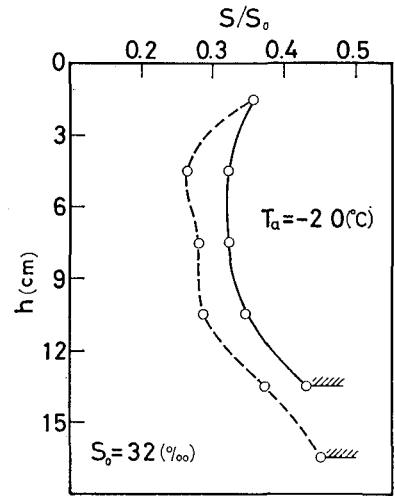


図-5 氷厚増加に伴う塩分量分布の変化

し、かつブライン流出が継続するのは、砂まじり海水の内部が圧力によって、次第に破壊されていって新しい水みちが形成されていき、最終的に、内部破壊が終わったところで、透水係数が一定値を示すものと考えることができる。このためには、砂や砂利を含んだ海水は局部的に強度の非常に弱いところがあると考えられる。海水が結氷する場合、淡水が結氷する場合と違って、海水中に海水を閉じ込めながら結氷する。この閉じ込められた海水をブラインと云うが、このブラインは氷厚が増加していく段階で次第に氷盤下面から排出されるし、このブラインの通過する道をブラインチャンネルといっている。図-5 は、塩分量 S_0 が 32‰ の海水を結氷させている時の氷盤内部の塩分量の鉛直分布を示したものである。実線が氷厚約 13.5 cm の時の塩分量を分布を示し、破線が氷厚 16.5 cm の時の塩分量分布である。約 3 cm 氷厚が増加する間に、全体的にかなりのブラインが排出している事を示している。このブラインチャンネルの直径は均一ではなく、その平均径も今回用いた砂や砂利の径に較べたら、はるかに小さいものである。今回の実験のように砂の間隙が海水で満たされている場合の結氷機構は非常に複雑で、ブラインチャンネルは砂や砂利で遮断されている可能性が強い。つまり上方から排出されたブラインは砂粒子で止められ、砂粒子の上にたまるような現象が起っている可能性があり、その部分が強度的に弱点になっていると考えることができる。次に圧力 P に対する透水係数の時間変化を示したものが図-6 および図-7 である。ダルシー則では、透水係数は条件が同一であるならば、圧力に無関係である。海水のみの場合は、著者等の過去の実験結果によると、海水中の液体の移動はダルシー則を完全に満足していた。図-6 は No. 2 の砂を含んだ場合で、図-7 は No. 3 の砂を含んだ海水

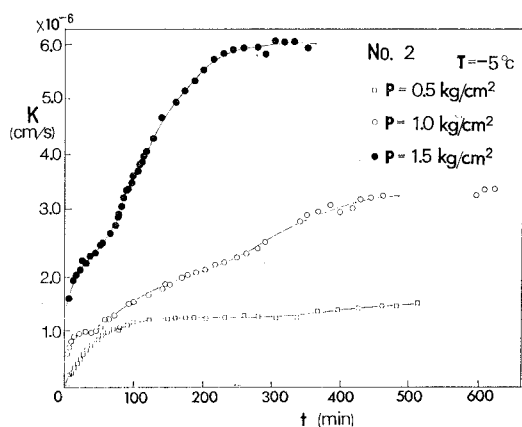


図-6 No. 2 の各圧力に対する透水係数経時変化

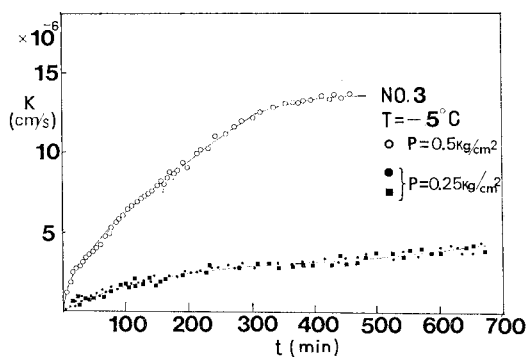


図-7 No. 3 の各圧力に対する透水係数の経時変化

の場合であるが、両方の場合とも、圧力 P が大きい方が透水係数が大きくなる事を示している。また、透水係数が一定になる時の値と比較してみると、透水係数は圧力 P と線形の関係ではなく、圧力増加とともに、急激に透水係数が大きくなることを示している。また、図-6、図-7 を較べてみると、砂粒子の平均径が大きい程、同一の圧力下では、透水係数が大きい事を示している。図-8 に氷温 -20°C 、海水の塩分濃度 6‰ の場合の圧力 P を変化させた時の透水係数の変化の様子を示す。圧力 $P=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の場合約 5 分後に透水係数は一定値になり、その後、圧力 P を 1.0, 1.5, 2.0 kgf/cm^2 と増加させても透水係数は一定である。つまりダルシー則を満足している事を示している。また、その時のブライン排出量 Q_s も、約 3 分後に最大を示し、約 6 分後にゼロとなり、その後は圧力を高めても Q_s はゼロである。つまり海水のみの場合は強度的にみて、局部的に弱いところがなく、水みちは一定していることを示している。図-9 に、氷温 -5°C で No. 2 の砂を用いた場合の圧力 P を変化させた時の透水係数及びブライン排出流量の結果を示す。この場合、 $P=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、400 分経過後からはほぼ一定の透水係数を示し、ブライン排出流量 Q_s は、15 分経過後に最大となり、その後は

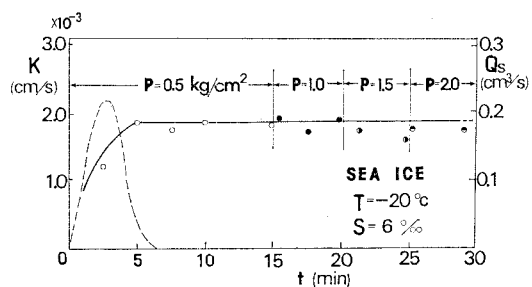


図-8 海水の場合の圧力変化に対する透水係数の経時変化

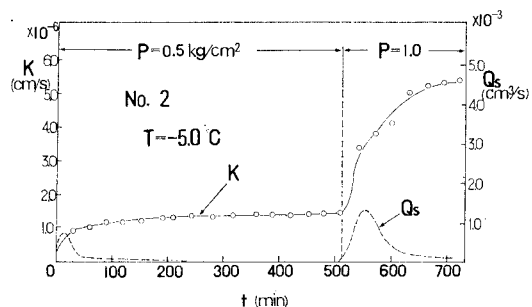


図-9 砂まじり海水の圧力変化に対する透水係数とブライン流量の経時変化

減少はしていくが長時間排出が継続する。500 分経過後に圧力 P を 1.0 kgf/cm^2 に増加すると、透水係数は急激に上昇し、 $P=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の透水係数の 3 倍を超える値を示す。それと同時に、ブライン排出量も、再び増えはじめ、増圧後約 50 分で再び極値を示すことになる。この図-8 と図-9 からいえる事は、前にも述べたように、海水の場合には、 $P \geq 2 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲では完全にダルシー則が成立していて、水みちも安定しているのに対して、砂や砂利まじりの海水の場合には、局部的に非常に弱い部分があり、時間の経過とともに水みちが増えていき、ある時間経過後に（300 分～400 分程度）破壊が終了して一定の透水係数を示す。それからさらに圧力を増加すると、さらに内部の破壊が進み、水みちが形成され透水係数も増大することになる。このため、砂および砂利を含んだ海水中の流れはダルシー則を満足していないことになると考えられる。氷温 -5°C の時の、各圧力に対する平均粒径 $\bar{D}$ と透水係数 K の関係を示したものが図-10 である。前にも述べたように、透水係数は経過時間とともに増大していくが、図中の透水係数は同一の圧力下で一定の透水係数になった時の値である。図からも明らかのように、同一の圧力条件下では、平均粒径が大きくなる程透水係数は大きくなるが $\bar{D} > 1 \text{ mm}$ でその傾向は顕著である。また、同一の粒径でも圧力 P が大きい程透水係数は大きくなる。また、平均粒径が小さくなると、圧力による透水係数の変化の範囲は小さくなる。これは、砂粒子の径が小さくなり、

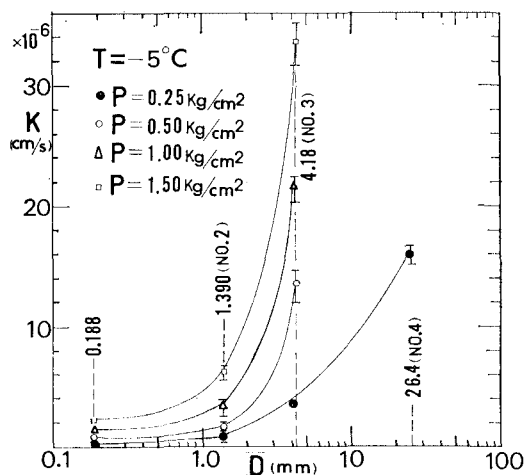


図-10 各圧力に対する平均粒径と透水係数の関係

ブラインチャネルの平均径に近づくと、ブラインチャネルから排出されるブラインの阻止効果が小さくなり局所的な強度低下が起こりにくくなるからと考える事ができる。以上の結果から、砂や砂利を含んだ海水を中詰材としているケーソン内圧の凍結時の予測をする場合、時間メッシュを、透水係数が一定になる10時間きざみ以上とすべきである。また、透水係数の補正も必要である。

5. 結 語

本実験の結果から以下の結論が得られた。

1) 砂および砂利を含む海水の透水実験を行なう場

合、実験データの分散が大きいため、多数の実験を必要とする。

- 2) 砂および砂利を含んだ海水の場合、砂あるいは砂利の近傍に、局所的に非常に強度の弱い所ができるため、一定圧のもとでも時間の経過とともに、透水係数は増加する。また、本実験の範囲から透水係数が一定になるのに300~500分を要する。
- 3) 砂および砂利を含んだ海水の場合、圧力を増加すると、海水内部で局所的破壊が起こり、透水係数は増大し、基本的にはダルシー則を満足しない。
- 4) 砂および砂利を含んだ海水の場合、圧力が増加および平均粒径の増大に伴って透水係数は増加する。
- 5) 砂および砂利まじりの海水を中詰材としたケーソン内圧のシミュレーションを行なう場合、時間のキザミは10時間程度とすべきであり、また、その時透水係数の補正も必要である。

参 考 文 献

- 1) 北海道開発局：氷海航行支援技術に関するフィジビリティスタディー-氷海域の港湾・沿岸工学に関する調査一，1983。
- 2) 佐伯 浩・泉 洌・小倉 滋・酒井雅史・尾崎 晃：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，pp.648~652，1983。
- 3) Saeki, H. Takeuchi, T. Sakai, M. and E. Suenaga, Experimental Study on Permeability Coefficient of Sea Ice, Proc. of 1st Intern. Conference of Ice Technology, pp.237~246, 1986。
- 4) 泉 洌・奥原信仁・竹内貴弘・山下俊彦・佐伯 浩：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-，第33回海岸工学講演会論文集，pp.506~510，1986。