

海水と砂よりなる中詰材の凍結によるケーソン内圧の増加に関する実験的研究

Variation of Inner Pressure in Caisson Type Structure due to Ice Growth

石井千万太郎*・佐藤英泰**・折谷徳弘***・渡部靖憲****・佐伯 浩*****・山下俊彦*****

Chimataro. Ishii, Hideyasu. Satoh, Norihiro. Oritani,

Yasunori. Watanabe, Hiroshi. Saeki and Toshihiko. Yamashita

ABSTRACT

Recently, caisson type structures have been employed as offshore structures in regions of extreme cold. As the liquid, sand or gravel filling proceeds, the caisson freezes and the internal pressure rises. It has previously been verified that this pressure rise, due to an increase of volume caused by ice growth, depends strongly upon the permeability coefficient of the sea ice forming within the sands and gravels. This paper deals with the variation of inner pressure in two kinds of model caissons due to ice growth.

KEYWORDS; Offshore Structure, Caisson Type Structure, Inner Pressure

1. はじめに

極寒冷地海域に建設される構造物には氷盤の移動による氷力が作用し、しばしば被害を及ぼすことがある。この氷力に関する研究は多くの研究者により行われており、研究成果の発表も多数ある。しかしケーソン型構造物の場合には氷力のほかに、重量増加のためにその内部に入れた中詰材が上層から凍結し、そのとき海水の相変化に伴い体積増加が生じ、ケーソンの内部圧力が増加しケーソンの隅角部が破壊してしまうということが起こる。しかしケーソン内部にどれだけの圧力生じるのか現在のところ解明されていないため、ポーフォート海では、ケーソンの内部をヒーティングして中詰材の凍結を防止している。我国においても網走港や宇登呂港の防波堤用ケーソンが、その内部が凍結し破壊したという例がある。

著者らは、この中詰凍結にともなう内圧増加に関する系統的な実験を行ってきた。その結果、中詰材として海水だけの場合には、上層の凍結した海水盤の透水係数が淡水氷と違って大きいことと、海水盤と壁面の間に内圧によりスリップが発生することにより、中詰材の上部に氷盤の上昇量と氷盤から出てくる透水量にみあう空間があればケーソン内の内圧の上昇は小さいことを明らかにした。さらに、中詰材として砂と海水をモデルケーソンに入れて、詳細な実験を行ったが、砂まじりの海水の場合の透水係数がダルシー則を満足せず、透水時間、圧力、砂の粒径等に強く依存することを明らかにした。

本研究では中詰材として海水と砂よりなるケーソンの内圧増加のメカニズムを実験により明らかにするとともに、内圧増加防止対策について述べる。

2. 実験方法

本実験では2つの鋼製のモデルケーソンを用いた。一方は高さ89.5cm、直径69.76cmの円筒形で、他方は高さが90.0cmで直径が底部から上部にかけて直線的に大きくなっている(69.6~71.0cm)テーパ付きのものである。両タンクの内部には、平均粒径7mmの小砂利を詰め、その間に塩分濃度30%の海水を満たし-10℃の低温室に入れて、それぞれのタンクについて内圧変化、タンクおよび氷盤表面の変形量、温度変化、凍結氷盤の上昇量、氷厚の変化、氷盤表面からの透水量を測定した。

砂と海水を二つの鋼製円筒形のモデルケーソンにいて、同一条件で表面から凍結させ、内圧変化と結氷盤のスリップ速度の関係を明らかにすることを主たる目的として実験を行った。このモデルケーソンの一つは鉛直方向に同一の直径を有する完全な円筒形、もう一つは、ケーソン底部の直径より上部の直径が2cm大きく、直径が直線的に変化しているモデルケーソンを用い、両者の比較を行っている。

*正会員 秋田大学鉱山学部土木工学科

**積水ハウス(株)

***正会員 北海道庁

****学生会員 北海道大学大学院

*****正会員 北海道大学工学部土木工学科 (札幌市北区北13条西8

丁目)

内圧の増加を抑制するための効果的な方法は二つ考えられる。一つは、透水係数が大きくなるような氷盤を造ることと、もう一つはケーソン壁と氷盤の凍着強度を低下させ、スリップし易くすることであるがテーバーをつけることにより、スムーズにスリップさせようとするものである。以後テーバーを付けたモデルケーソンをタンク B、一様な径のものをタンク A という。実際のケーソン型の海洋構造物の場合、大半が海中に没していて、主に上部から凍結が始まることになるので、本実験においても側面からの熱の出入を可能な限り減らすため、厚さ30mmの断熱材を4層に巻き、底盤の下には50mmのスタイロフォームを三段重ねにして断熱した。また両タンクを -10°C の低温室に入れて実験を行った。両タンクの内部には、平均粒径 7mm の小砂利を詰め、その間に海水を満たした。海水の塩分量は、一般の海水より塩分濃度をうすくして30‰とした。これは、より内圧が上昇しやすくするためである。図1に示すように、両タンクには内圧測定用の防水型の圧力変換器とタンクの変形量を測定するための歪ゲージ、それにタンクの温度を測定するための温度センサー、それに凍結氷盤の上昇速度を測定するためのダイヤルゲージを設置した。各センサーからのデータはデータロガーに記録した。また、砂利まじりの海水と鋼板との凍着強度を調べるために、スチールのシリンダーの底に金網を引き、その中に砂利を入れ、海水を入れたタンクの中に入れて凍らせ、所定の氷厚になったところでシリンダーごと取り出し、図2に示すような Push out test により凍着強度を調べた。シリンダーの内径は10cm、高さ20cm、砂利を含んだ海水の厚さは10cmとし、海水の塩分量はタンクの場合と同様に30‰とした。実験は水温 -3°C と -10°C で行った。また、用いた粒径は、7mm・5.4mm・0.7mm の三種類であった。また、タンクの場合と同様に 7mm の小砂利を含む海水の透水係数についても実験を行った。

3. 実験結果

まず、A, B 両タンクの内部圧力の変化を調べることにする。タンク A のタンク内圧の時間変化を示したものが図3 (a)である。図中の破線はタンクの上部から10cmの位置での圧力変化 (P_{A1}) であり、実線は上部から70cm (底から20cm) の位置での圧力変化 (P_{A2}) である。同図からも明らかなように、 P_{A1} の方は、結氷後急激に内圧が上昇している。これは、氷厚が増加し、圧力変換器の表面まで成長したことを示していて、その氷盤が圧力センサーに作用しているためと見られる。一方、下方にある P_{A2} の圧力は 6~12時間の周期で変動しながら結氷後200時間まではゆるやかに圧力が上昇しているが 200時間を過ぎると急に圧力の上昇速度が大きくなっている。そして 300時間をすぎると圧力の上昇は止まり、変動成分のみとなる。この時の内圧は約

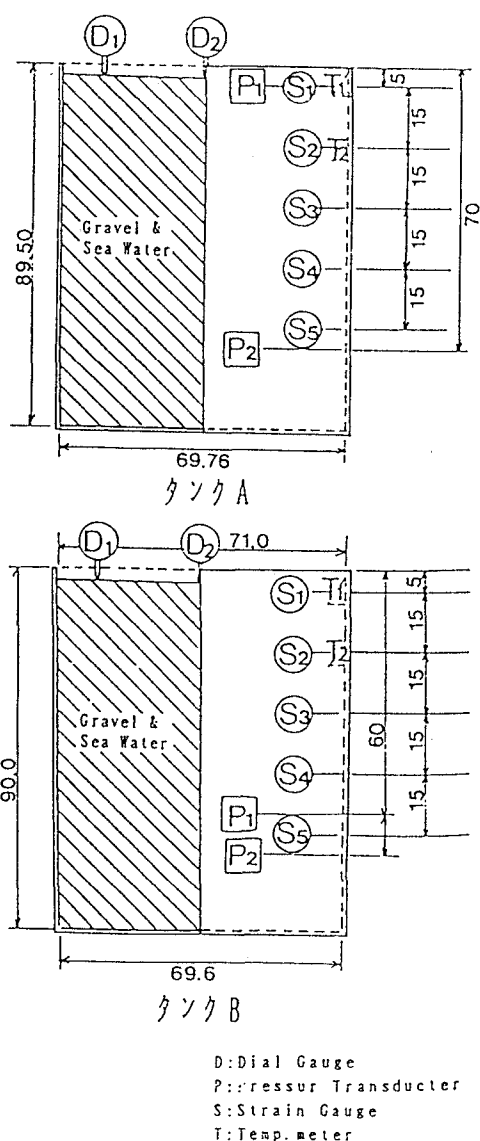


図-1 モデルタンクの形状

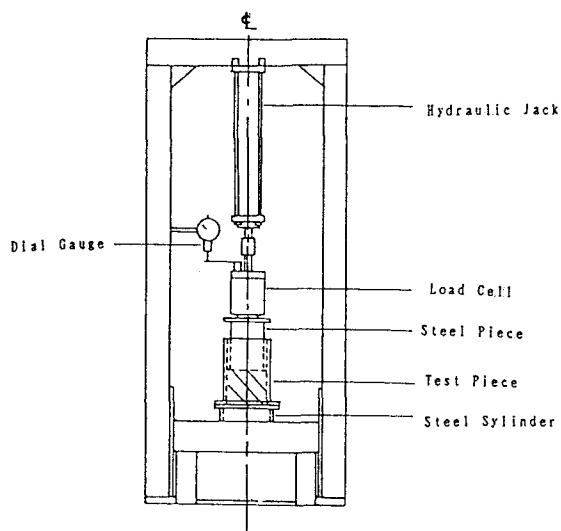


図-2 凍着強度実験装置

0.4Kg/cm²である。これに対して、テーバーをつけたタンクの内圧変動を図3(b)に示す。この図からも明らかなように、結氷開始後240時間くらいまでは比較的急に圧力が上昇するが、その後はゆるやかに上昇する。また内圧の大きさも、タンクAの場合の約半分となっているし、また、その内圧の変動もタンクAの場合に較べたら小さい。前述したように、タンクの半分以上が凍結しても、それ程圧力の上昇がない主たる原因は、海水盤の透水係数が比較的大きいことと、氷盤自体が内圧により壁面との間にスリップを起こし上昇するためであるが、内圧による透水量の変化はゆるやかであることから、この内圧の10~20時間周期の変動は氷盤のスリップが連続的に起こっているのではなく、間欠的に起こっているためと判断される。テーバーのついているタンクBの内圧の変動量がタンクAのそれに較べて小さいのは、上昇するにつれて断面が大きくなっているので氷盤がスムーズに上昇するためと思われる。次に両タンクの氷盤の上昇速度(mm/min.)の時間変化を調べたものが図4(a)、(b)である。タンクAについて図3(a)と図4(a)を較べてみると、内圧変動の上昇時には氷盤の上昇速度(スリップ速度)は小さく、内圧変動において内圧が急に下がる時は、スリップ速度は急に速くなっていて、内圧変動と氷盤の上昇速度は非常に良い対応をしている。これはテーバーをつけたタンクBの場合も同様に内圧変動と氷盤の上昇速度は良い対応を示している。このことから、内圧の10~20時間の変動は、氷盤の上昇が断続して起こっていることに起因していることを裏づけている。また、図4の(a)、(b)を比較すると、テーバーを付けたタンクBの方は長時間経ても上昇速度は比較的大きく、氷盤がスリップし易いことを示していて、これが内圧の増加を抑える効果を示している。またタンクAの場合255時間以降の氷盤の上昇はほぼ零であるのに、内圧はほぼ0.4Kg/cm²と一定であるのは、氷盤の透水量で平衡が保たれているものと考えられる。つぎに、A、B両タンクの氷盤の上昇量を調べた結果が図5である。上昇量の測定位置は内壁近傍である。氷盤の上昇量はタンクBの方がはるかに大きく、タンクAの約2倍となっていて、結氷開始後360時間で約8cmとなっている。これに対してタンクAは約4cmである。また、タンクAは150時間後はほとんど上昇量が零になっている。これは、タンクAの場合は結氷初期(200時間くらいまで)は、氷盤の上昇速度内圧低下に寄与し、250時間以後は氷盤の透水性が内圧低下に寄与しているし、タンクBの場合は、結氷初期は氷盤の透水性が、150時間以後は氷盤の上昇が内圧低下に寄与していることが明らかになった。図6にタンクA、Bの氷厚の増加のグラフを示す。図からも明らかなように、タンクAの方がタンクBの場合よりも、同じ積算寒度でも氷厚はうすくなっている。この理由は、タンクAの方は透水量が多いため、

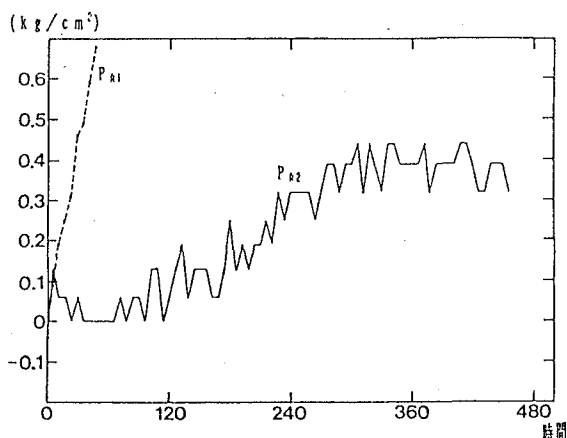


図-3(a) タンクAの圧力変化

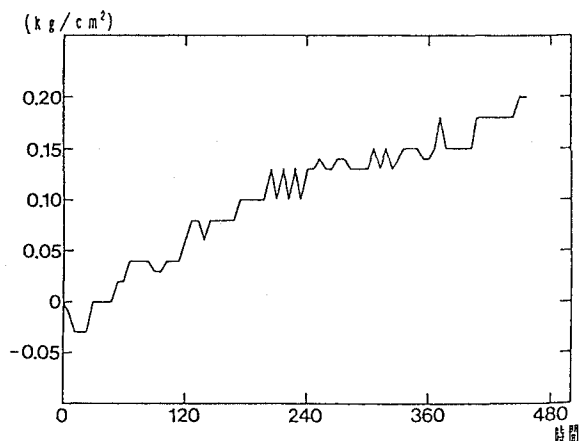


図-3(b) タンクBの圧力変化

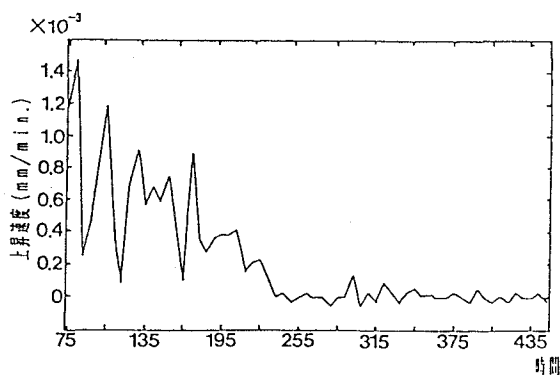


図-4(a) タンクAの氷盤の上昇速度

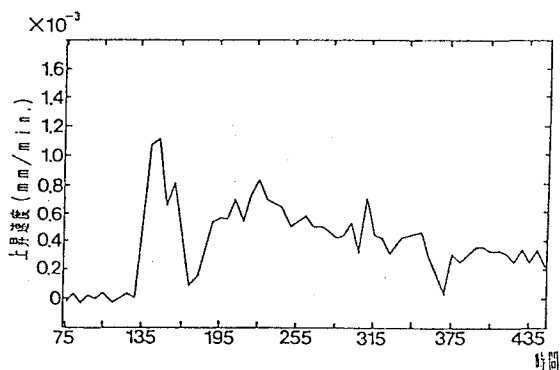


図-4(b) タンクBの氷盤の上昇速度

氷盤の上に濃い塩分量の海水がたまり、それが断熱効果となって氷厚の成長を抑えている。これに対してタンク B の方は、氷盤の表面には、氷盤を透過してきた海水はほとんどなく、内圧低下が氷盤のスリップによっていることを裏づけている。

タンクの径を D 、氷厚を H 、内圧を P 、タンク壁面に作用するせん断力を T_B とすると、次式が成立する。

$$\frac{\pi}{4} D^2 \times P = \pi D \times H \times T_B$$

$$T_B = \frac{P \cdot D}{4 H} \quad (1)$$

タンク B の場合、氷厚が 40 cm で内圧 P は 0.4 Kg/cm^2 であるから

$$T_B = 0.088 \text{ Kg/cm}^2$$

となる。著者らが平均粒径 7 mm の小砂利を含んだ海水の Push out test を行った結果、凍着強度は -3°C で 0.23 Kg/cm^2 、 -10°C で 0.49 Kg/cm^2 であった。このことから判断すると、テーパのついたタンクの場合、氷盤の上昇速度が速いため、氷盤は氷厚全体にわたってケーソン側壁と凍着しているのではなく、ごく一部しか凍着していないものと考えられる。

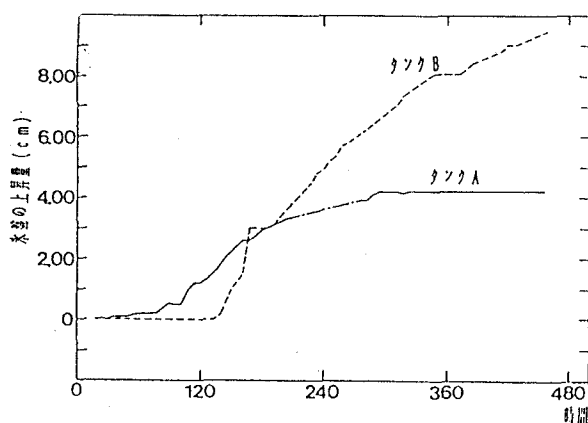


図-5 A, Bタンクの氷盤の上昇量

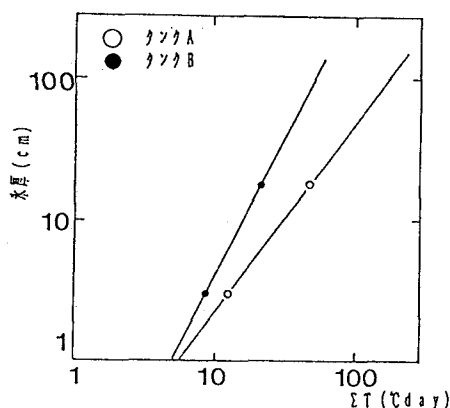


図-6 氷厚と積算寒度の関係

4. まとめ

- 1) 著者の一人である佐伯の過去の実験結果と同様に、ケーソン中詰材が海水のみの場合より砂を含んだ海水を用いた場合の方が内圧はより小さくなることを確認した。
- 2) タンクにテーパ (1/90) をつけると内圧の増加を抑えることができ、円筒型のタンクの約 1/2 の内圧になる。また内圧の変化の範囲も小さくなる。
- 3) 内圧の変動と氷盤上昇速度の変動はよく一致し、内圧の 10~20 時間周期の変動は氷盤のスリップが断続的に起こっていることが確認できた。
- 4) テーパー付タンクの内圧低下機構は、主に氷盤自体のタンク内壁とのスリップによる上昇によるもので、円筒型のタンクは主に氷盤の透水性による。
- 5) テーパー付タンクの方が氷厚の増加速度が大きい。これはテーパのないタンクの場合、氷盤を透水した高塩分量の海水が氷盤の上部にたまり、それが断熱の効果をもたらしたと思われる。
- 6) 砂利を含んだ海水の凍着強度試験の結果から、テーパ付のタンクの場合氷盤の移動速度が速いため、氷盤は全体にわたってタンク内壁と凍着しているのではなく、ごく一部しか凍着していないことが確認された。これは海水と砂を鋼管内で凍結させそれを押し抜く方法で、砂を含んだ海水と鋼管内壁間の凍着強度を求めたが、その強度の方がタンク内壁より求めた見かけの凍着強度よりはるかに大きかったことによる。
- 7) 中詰材の約 60% が凍結しても、円筒型のタンクで 0.4 kgf/cm^2 、テーパ付のタンクで 0.2 kgf/cm^2 と小さかった。これはタンク上部が閉ざされてなく、氷盤が上昇したり海水が透水する空間があったため、逆にこのような空間を設けておけば内圧は大きくならない。
- 8) 以上より、極寒冷地海岸・海洋にケーソン型構造物を建設する場合、氷盤を上昇し易くする構造 (テーパをつける) や凍着強度の小さい材料でケーソン内壁を覆うことにより、ケーソン内圧の増加を小さくすることができる。また中詰材の上部に適当な空間を設けたり、氷盤の透水性をよくするために中詰材として平均粒径の大きな砂利を用いることにより内圧増加を制御することが可能となる。

本研究は文部省科学研究費、一般研究(B)によったものであることを付記する。

参考文献

- 1)中澤直樹，五十嵐 昇，竹内貴弘，小野敏行，佐伯 浩：海水と構造物表面間の凍着強度について，寒地技術シンポジウム論文集，1985
- 2)奥原信仁，泉 冽，山下俊彦，佐伯 浩：海水の透水係数の推定方法について，寒地技術シンポジウム論文集，1986
- 3)佐伯 浩，後藤克人，角原英人，村木義男，泉 冽：砂と砂利を含んだ海水の透水係数に関する実験的研究，寒地技術シンポジウム論文集，1988
- 4)水谷圭一，後藤克人，山下俊彦，佐伯 浩：土砂を含んだケーソンの中詰め材凍結に関するモデル実験，寒地技術シンポジウム論文集，1989