

圧を測定した。

実験装置を図-3に示す。直径3.0 m、深さ2.5 mの容器に試料を充填しこの中に直径50 cm、深さ50 cm、容量70 ℓの模型タンクを設置する。この模型タンクの冷却によりタンク側壁に発生する凍上圧をタンク側壁に設置した土圧計により測定する。

土圧計のほかに、地中の温度分布を測定する熱電対、地表面の変位を測定する変位計を設置した。

使用した土圧計は、直径30 mm、容量2.0 (Kg/cm²)、受圧面最大変位が1/3300 mmの水銀バネ型を使用した。土圧計の温度変化によるドリフトは、あらかじめ検定を行い、実測値を補正した。その検定結果の一例を図-4に示す。

図-4 土圧計の温度変化によるドリフト

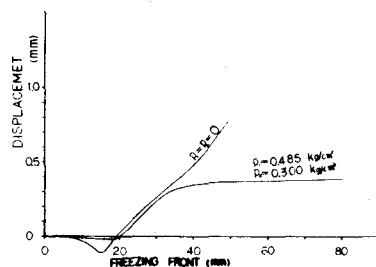


FIG-5 DISPLACEMENT OF FROZEN SOIL WALL

図-5 凍土壁の変位

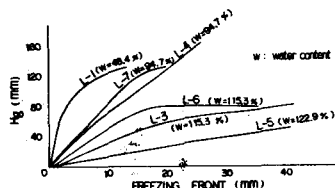


FIG-6 PRESSURE OF FROZEN SOIL WALL

図-6 凍土壁の圧力(水銀マンメータ法)

3. 実験結果と考察

3-1 予備実験の結果

実験結果を図-5、図-6に示す。試料が土丹の場合にタンクの周辺土は凍結面の進行とともに内側に変位を生じた。ロームのような凍上率の大きい地盤の場合にも内側に変位を生じたが、その傾向はロームの含水比により異なり含水比の大きいほど変位量は小さかった。

以上の予備実験の結果、タンク側壁の周辺土が凍結した場合にタンク側壁が可撓性の際には内側に変位を生じることがわかった。

3-2 土圧計による測定結果と考察

o 凍結領域の進行

凍結領域の進行の実測値と計算値を図-7、図-8に示す。計算は半球型の地下タンク周囲の平衡凍結面の非定常近似解を使用した。

その結果、実測値と計算値は砂、ローム地盤の場合によく一致した。写-1に砂地盤の凍土の状況を示す。

o 凍上圧の変化

凍上圧の変化の実測値と計算値を図-9、図-10に示す。計算は次のように行った。

未凍結領域

a: タンク内径
b: タンク外径
r: 凍結面半径
Pb: タンク側壁に作用する凍上圧
Pr: 凍結面における凍上圧
 ξ : 凍上率
E: ヤング率
 μ : ポアソン比

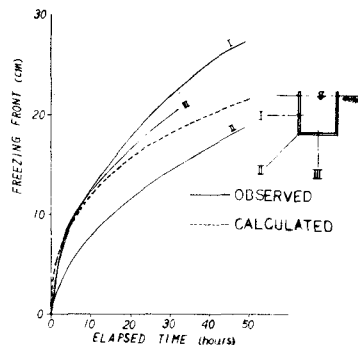
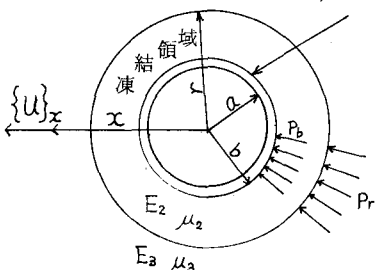


FIG-7 PROGRESSIONS OF FREEZING FRONT (SAND)

図-7 凍結領域の進行(砂地盤)

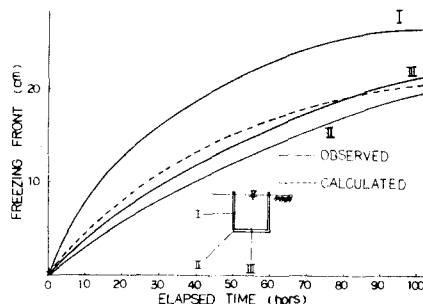


FIG-8 PROGRESSIONS OF FREEZING FRONT

図-8 凍結領域の進行(ローム質地盤)

凍結面半径が r から r' 迄微量増加したとするとタンクの変形を省略すれば

$$r = \sqrt{\frac{\frac{E_2}{2} \cdot r'^2}{\frac{E_2}{2} - (Pr - Pr') + \frac{\mu_3}{E_3}}} \quad \text{-----(1)}$$

ここで $\bar{\xi}$ は半径 r から r' 迄増加する間の平均凍上率であり Pr' , Pr によって変化する。このときタンク外壁にかかる圧力の増加分は

$$\Delta P_b = \frac{\frac{2}{E_2} \cdot \frac{r^2}{r^2 - b^2}}{\left\{ \frac{1}{E_1} \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} - \mu_1 \right) + \frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{b^2}{r^2 - b^2} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot \frac{r^2}{r^2 - b^2} \right\}} \cdot \Delta Pr \quad \text{-----(2)}$$

これを r について b から r 迄積分すれば凍結面半径が r のときのタンク外壁にかかる圧力が計算される。計算方法は Pr を適当に分割し、このときの $\bar{\xi}$ を凍上試験の結果より求め、(1)式に代入して r を定め、 $P_b = \int_b^r \Delta P_b$ の積分を行なう。

以上の計算値と実測値を比較してみると、タンク側壁の中央部ではよく一致しているが上部では異なっている。これは上記の計算が二次元解析のために生じたものと考えられる。

o 地表面の変位

凍結領域の進行に伴って地表面に変位を生じる。地表面の水平変位の実測値と計算値は図 - 11、12 ようになる。

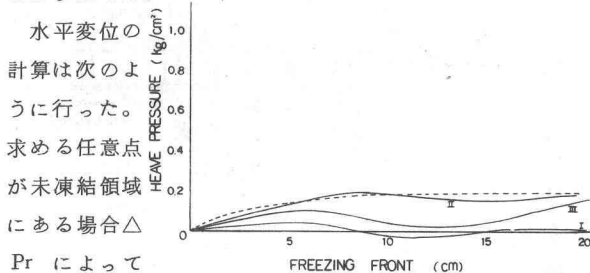


図 - 9 側壁凍上圧 (砂地盤)

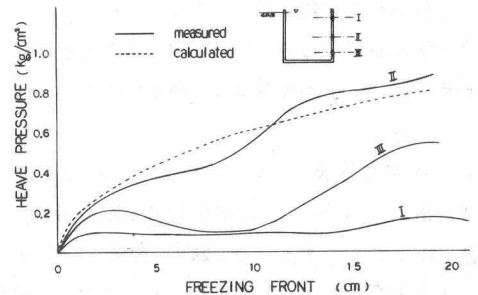


図 - 10 側壁凍上圧 (ローム質地盤)

Pr によって

生じる変位は、

$$\Delta \{u\}_x = \frac{r^2 \Delta Pr}{x \cdot E_2} (1 + \mu_2) \quad \text{----- (3)} \quad \text{任意点が凍結領域にある場合は}$$

$$\Delta \{u\}_x = \frac{1 - \mu_1}{1 + E_1} \cdot \frac{b^2 \Delta P_b - r^2 \Delta Pr}{r^2 - b^2} \cdot x + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \cdot \frac{b^2 r^2 (\Delta P_b - \Delta Pr)}{r^2 - b^2} \cdot \frac{1}{x} \quad \text{----- (4)} \quad \text{となる。}$$

実測値と計算値はタンク近傍では良く一致するが離れるにつれて差が生じてくる。これは地表面からの入熱の影響と考えられる。

4. ま と め

低温地下タンクの側壁に生じる凍上圧は、ローム質地盤の場合に最大 $1.0 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$ 、砂地盤の場合 $0.2 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$ が測定されその傾向は計算と良く一致した。

その他、凍結進行速度、地表面の変位などの測定と理論解析を試みたが、まだ不十分で今後の研究の必要性を痛感した。最後にこの研究に際し御助言をいただいた北大低温科学研究所木下誠一教授に感謝いたします。

参考文献： 1) 高志 勤：液化低温ガス貯蔵用地下タンク周囲の地盤の凍結について(Ⅲ)冷凍 47 巻 536 号

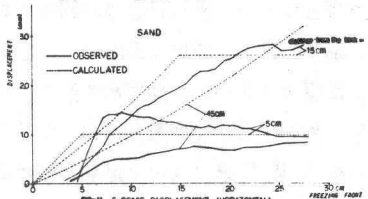


図 - 11 地表面の水平変位 (砂地盤)

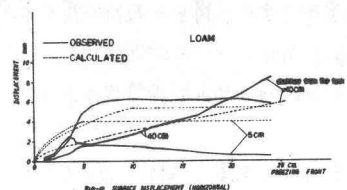


図 - 12 地表面の水平変位 (ローム質地盤)