

三井建設株土木技術部研究室 ○正 田村富雄

同

伊藤達男

同

米倉宏行

1. まえがき

低温地下タンクの周辺地盤が凍結すると、凍上現象によりタンク側壁と周辺の未凍結地盤に圧力を及ぼす。この凍上圧は、土の凍上率、凍結進行速度、未凍結領域の土の力学的性質などに支配され、低温地下タンクの側壁及び周辺の地上地下構造物に重大な影響を与えると考えられる。

しかし、このような凍上圧に関する研究は少く、特にタンク側壁に発生する凍上圧の実験、研究は皆無である。

この報告は、模型タンクの側壁に発生する凍上圧を特殊な温度補正をした土圧計により測定した結果と理論解析の結果について述べる。

2. 実験方法

2-1 試料の性質

実験に使用した試料の性質を表-1に示す。

2-2 予備実験

地下タンク側壁に作用する凍上圧を定性的に把握する目的で次の実験を行った。

○ 側壁変位の測定

図-1のように不攪乱の土丹試料の中央に模型タンクを設置し、タンク周辺土の凍結の際の側壁近傍土の水平移動量を4個のダイアルゲージで測定した。

試料土の載荷は垂直方向(P_1)、水平方向(P_2)の二方向で行った。

○ 水銀マノメータ法による測定

図-2のように乱したロームの中央に模型タンク(軟質ポリエチレン)を設置し、その中に水銀を充填し、この水銀の冷却により周辺土が凍結し、その際発生する凍上圧によりタンクの容積が変化する。これを水銀マノメータで測定した。

水銀を充填した容器は、あらかじめ温度検定を行い、この検定値で実測値を補正した。

2-3 土圧計による側壁凍上圧の測定

上圧の測定

上記の予備実験の結果、地下タンク側壁に作用する凍上圧の傾向を把握することができたので、さらに精度よく、しかも定量的に把握するために地下タンク側壁に土圧計を設置して凍上

試料名	土	砂	石
密度	6.45	1.700	1.494
含水比 (%)	45.9	33.8	82.1
則り度 (%)	1.34	1.08	2.23
凍結率 (%)	68.5	4.5	80.6
側壁強度 (kg/cm²)	8.13	—	1.75
側壁強度 (kg/cm²)	652.0	15.0	31.6
側壁高さ (cm)	0.240	1.198	0.489
凍上率 (%)	7.2	2.1	13.4
側壁強度 (kg/cm²)	42.3	78.0	91.0
側壁強度 (kg/cm²)	25.00	6118	4313
側壁高さ (cm)	0.410	2.274	0.800
側壁強度 (kg/cm²)	25.11	20.21	35.90

表-1 試料の性質

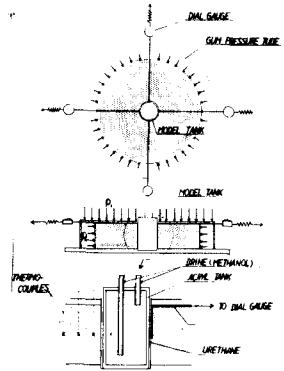


図-1 実験装置(変位法)

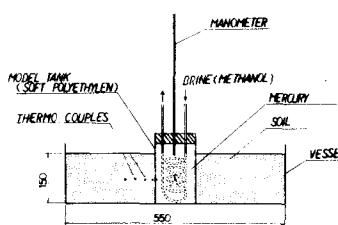


図-2 実験装置(水銀マノメータ法)

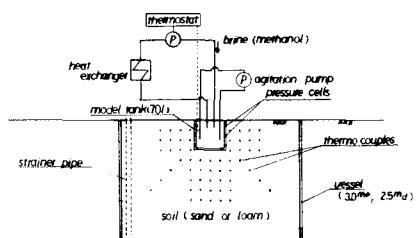


図-3 実験装置(土圧計法)

圧を測定した。

実験装置を図-3に示す。直径3.0m、深さ2.5mの容器に試料を充填し、この中に直径50cm、深さ50cm、容量70ℓ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3.0mm、容量2.0(Kg/cm²)、受圧面最大変位が1/3300mmの水銀バージ型を使用した。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。

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

P_b: タンク側壁に

作用する凍上圧 {u_x}

P_r: 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

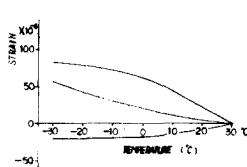


図-4 土圧計の温度変化によるドリフト

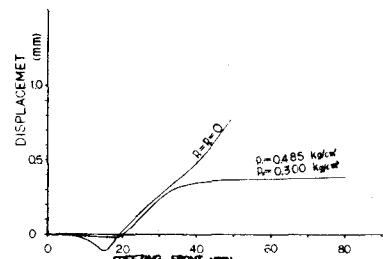


図-5 凍土壁の変位

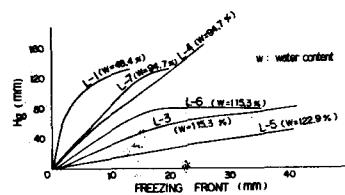


図-6 凍土壁の圧力(水銀マノメータ法)

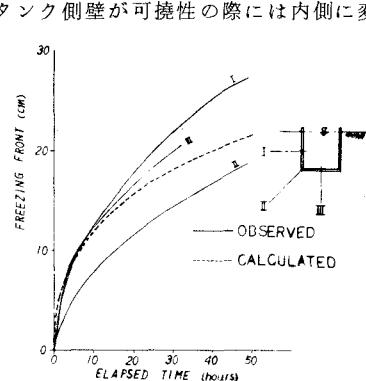


図-7 凍結領域の進行(砂地盤)

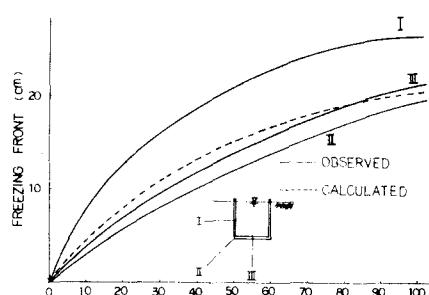


図-8 凍結領域の進行(ローム質地盤)

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

$$r = \sqrt{\frac{\frac{m}{2} \cdot r'^2}{\frac{E}{2} - (P_r - P_{r'}) \frac{1 + \mu_3}{E_3}}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで ξ は半径 r' から r 迄增加する間の
平均凍上率であり $P_{r'}, P_r$ 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

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

$$\frac{1+\mu_2}{E_2} \cdot \frac{r^2}{r^2 - b^2} \} \cdot \Delta P_r \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

これを r について b から r まで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 r を凍上試験の結果より求め、(1)式に代入して r を定め、

$$P_b = \int_b^r \Delta P_b \quad \text{の積分を行なう。}$$

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。

○ 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のようになる。

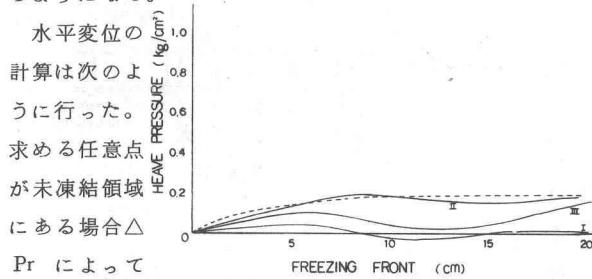


図-9 側壁凍上圧(砂地盤)

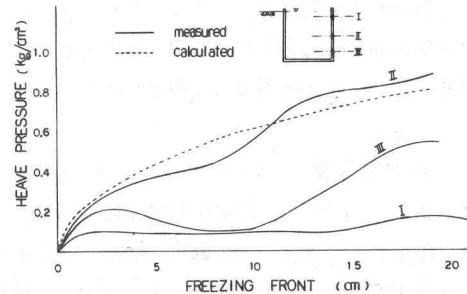


図-10 側壁凍上圧(口-ム質地盤)

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

$$\Delta\{u\}_x = \frac{1-u_1}{1+E_1} \cdot \frac{b^2 \Delta P_b - r^2 \Delta P_r}{r^2 - b^2} \cdot x + \frac{1+u_1}{E_1} \cdot \frac{b^2 r^2 (\Delta P_b - \Delta P_r)}{r^2 - b^2} \cdot \frac{1}{x} \quad \dots \quad (4) \quad \text{となる。}$$

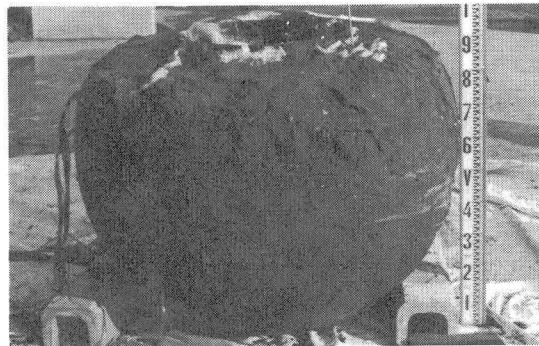
実測値と計算値はタンク近傍では良く一致するが離れるにつれて差が生じてくる。これは地表面からの入熱の影響と考えられる。

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、まだ不充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(II) 冷凍 47 卷 5 366 号



写 - 1 タンク周辺の凍土

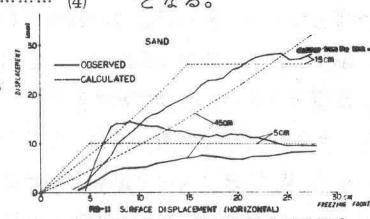


図-1.1 地表面の水平変位(砂地盤)

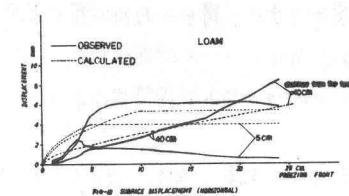


図-12 地表面の水平変位(ローム質地盤)