

大林組土木本部技術部 河野 彰

" 技術研究所 ○内藤 和章

精研冷機 高志 勤

1. ま え が き

地下式のLNGタンクの場合、LNGが極低温であるため、断熱材を設けても、周辺地盤が凍結し、凍結膨張圧と変位が発生する。この凍結膨張圧と変位は、タンク躯体の設計、群設タンクの場合の相互干渉、周辺構造物への影響の把握上、きわめて重要なものである。

この報文は、80KLの実験タンクによる凍結膨張圧と変位の測定結果と、これらを算定するための理論計算式の妥当性について述べたものである。

2. 凍 結 膨 張 圧

タンク周辺の土が凍結すると、その体積膨張により、タンク躯体と、周辺地盤に圧力を及ぼし、これを凍結膨張圧と称す。凍結膨張圧の大きさは、温度、凍結速さ、凍結土の膨脹性、未凍結領域の土の強度などに影響されるといわれている。

凍結膨張圧は、土圧計をタンク躯体あるいは、周辺未凍結地盤に設置することにより測定できるが、前者の場合、低温用土圧計がなかったこととタンク躯体に作用する凍結膨張圧は小さいと推定されたので、本実験では後者の方法により測定した。

土圧計(カールソン型)の設置位置を図-1に、測定結果を図-2に示す。図-2に、土圧計の温度も併記したが、これによると土圧計の温度が0℃(凍結前線が到達)になった時点で、膨張圧がピークに達していることがわかる。

さて、図-3に記した条件で、凍結領域と未凍結領域の境界面における凍結膨張圧 σ_{r1} を計算すると、つぎのようになる。⁽¹⁾

$$\sigma_{r1} = \frac{\frac{\xi}{2}(R^2 - r^2) - \beta T r^2 + \frac{\gamma^3 B}{E_3 t} + \frac{1 + \nu_1}{E_1} R^2 \sigma_{\infty}}{\frac{1 + \nu_1}{E_1} R^2 + \frac{\gamma^3 A}{E_3 t}} \quad (1)$$

ただし、

$$A = \frac{2 R^2}{R^2 + r^2 + (\nu_2 + \frac{E_2 r}{E_3 t})(R^2 - r^2)} \quad (2)$$

$$B = \frac{E_2 (R^2 - r^2) \beta T}{R^2 + r^2 + (\nu_2 + \frac{E_2 r}{E_3 t})(R^2 - r^2)} \quad (3)$$

そして、タンク躯体に作用する凍結膨張圧 σ_{r2} は

$$\sigma_{r2} = A \sigma_{r1} - B \quad (4)$$

となる。ここに、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 σ は応力、 r はタンク半径、 R は凍結半径、 t はタンク壁体厚、 ξ は土の凍結膨脹率、 β はタンク壁体の線膨脹係数、 T は温度差である。

本実験タンクの場合、 $r = 2.60 \text{ m}$ 、 $R = 4.60 \text{ m}$ (土圧計位置)、 $t = 0.30 \text{ m}$ 、 $\nu_1 = 0.3$ 、 $E_1 = 7.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 、 $\nu_2 = 0.2$ 、 $E_2 = 2 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 、 $\xi = 0.03$ (凍上試験器による)、 $E_3 = 1 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ (凍結コンクリート)、 $\beta = 1.3 \times 10^{-5}$ (全上)、 $T = 20.0^\circ\text{C}$ (9月25日における常温との差)とすると、(1)式より

$$\sigma_{r1} - \sigma_{\infty} = 0.556 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

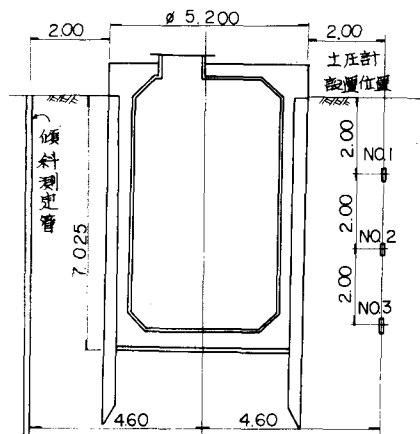


図-1 土圧計、傾斜計設置位置

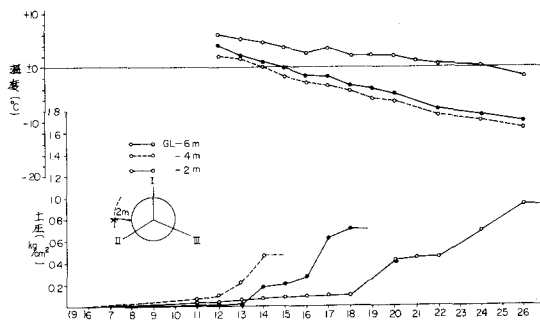


図-2 凍結膨張圧経時変化

となる。一方、図-2 より、凍結前線が土圧計位置に到達したときの土圧 ($\sigma_{r1} - \sigma_{\infty}$ に相当)は、 $0.5 \sim 0.9 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ であり、計算値は、やゝ小さい値を与えている。

これは、(1)式の σ_{r1} が ξ に大きく左右され、 ξ は凍結速さが遅い程大きい(凍上試験では 12 mm/nr 、実験タンクでは 1 mm/nr) ことによると考えられる。

つぎに、(4)式より σ_{r2} を算定すると、 $\sigma_{r2} < 0$ となる。すなわち、凍結膨張圧は、タンクには作用しないことになり、このことは、同標題(その2)の報文の応力測定結果および後述の地表面変位測定結果を裏付けている。

3. 地盤水平変位

地盤水平変位は、図-1に併記した位置に、ガイドパイプを設置し(3ヶ所)、差動トランス式管内傾斜計を用いて測定した。なお、パイプ頭部の変位は、不動点から、スチールテープにより測定した。

測定結果の1例を図-4に示す。GL-3.00mにおける水平変位量(3ヶ所の平均)の経時変化を図示すると、図-5のようになった。

さて、半径 ℓ の位置における水平変位量 $\delta \ell$ を計算すると、結果は、つぎのようになる。

$$\delta \ell = \frac{1 + \nu_1}{E_1} (\sigma_{r1} - \sigma_{\infty}) \frac{R^2}{\ell} \quad (5)$$

凍結半径 R の経時変化測定値より、所定の R に対して、 $\ell = 4.60 \text{ m}$ に対する $\delta \ell$ を(5)式より算定すると、図-5に併記したようになり、測定値と計算値は、ほぼ一致する。ところが、2.で述べたように($\sigma_{r1} - \sigma_{\infty}$)は過小の値を値えているので、(5)式による $\delta \ell$ は過大の値を与えている。

4. 地表面変位

地表面に設置した測量グイを用いて地表面浮上量を測定した結果を、図-6に示す。これによると、浮上は凍結前線の法線方向に、せり上るように起つている傾向がみえる。一方、タンクの浮上は、周辺地盤の浮上より著しく小さい。これは、2.で述べたように、タンクに作用する膨張圧は小さく、したがって、タンク壁面と周辺地盤のマサツ力が小さくて、タンクは、底面の凍結膨張による浮上と、タンク自重の差に対応するだけの浮上が単独に起つているためであると考えられる。

5. 結 び

以上の実験結果と、考察によると、つぎの推論が得られる。〔1〕凍結膨張圧は、凍結速さを考慮した凍結膨張率を用いれば、(1)式より算定してよいであろう。〔2〕(5)式より求めた地盤の水平変位量は、やゝ過大な値である。〔3〕地表面浮上は著しいが、タンク自身の浮上は少ない。

なお、本実験は、大林組、精研冷機、日本ソフラン化工3社の共同実験であり、実験に御協力いただいた関係各位に深く感謝致します。

参考文献：(1)高志；凍結膨張による未凍結領域内の土圧の変化の経時変化、土木学会論文報告果第200号
(2)高志・住吉；上載荷重がある場合の開放型凍上における凍上量の増減について、第24回年次学術講演概要

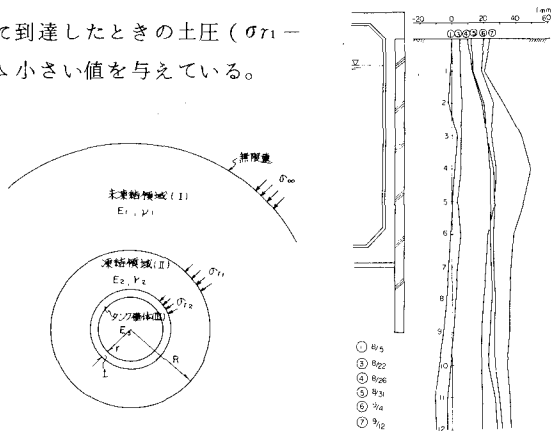


図-3 理論計算条件

図-4 水平変位量測定結果

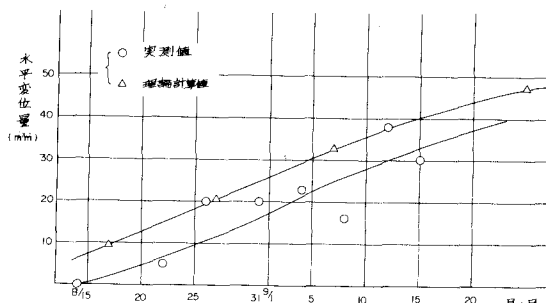


図-5 GL-3.00m 水平変位量と理論計算結果

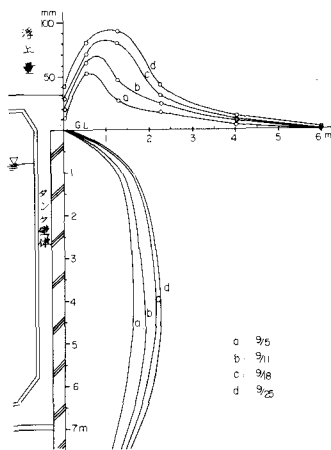


図-6 地表面変位量測定結果