

清水建設(株)土木技術部 正員 山田正男

1. まえがき LNG貯蔵用地下タンク周囲地盤に凍結膨張が起れば、時間経過につれてタンクおよびタンク周囲構造物などが凍結膨張の影響により損傷する場合があるので、このような問題に対する一対策法として、膨張変位を解放させて膨張圧を低減させ、さらに膨張変位の影響を自動消去しうる変位解放孔をタンク周囲地盤内に設置する方法を提案した¹⁾。この方法は原理が簡単で、しかも維持費がかからず、モデル実験によって実用的効果が立証されている²⁾。なお、実物タンク周辺に試験的に設置した変位解放孔の長期計測も行なわれている。

変位解放孔設置の時期として、地下タンクにLNGを貯蔵する前(その1)と、タンク周囲地盤に凍結領域発生後(その2)が考えられるが、本文では、凍結領域発生後の任意時点で、凍結領域のすぐ外側の未凍結地盤内に上記の変位解放孔を設置する場合における凍結膨張圧、膨張変位および孔縁変位などの解析を述べる。

2. 解析の概要と仮定

図-1は解析用モデルである。ここでは、円筒状凍結を対象とする。タンク周囲地盤に変位解放孔を設置しない場合、図示のように凍結領域 $\gamma = \theta$ が成長したときにおける膨張圧、膨張変位はそれぞれ p 、 δ で、未凍結地盤内の $\gamma = l_1$ 、 l_2 点の半径方向主応力はそれぞれ $\sigma_{r=l_1}$ 、 $\sigma_{r=l_2}$ である。

凍結領域 $\gamma = \theta = \theta_0$ の時点で、孔幅 $(l_2 - l_1)$ なる変位解放孔を瞬時に設置すれば、 $\sigma_{r=l_1}$ と孔内圧 w の差 $\Delta\sigma_{r=l_1}$ に対応して、膨張圧 p は p_0 に変化すると共に、 $\gamma = l_1$ 点は Δ_1 点に変位する。また、同時に $\sigma_{r=l_2}$ と w の差 $\Delta\sigma_{r=l_2}$ に対応して、 $\gamma = l_2$ 点は Δ_2 点に変位する。したがって、 $\gamma = \theta_0$ 点に膨張圧 p_0 が、 $\gamma = \Delta_1$ 、 Δ_2 点に孔内圧 w が作用する状態で掘削孔縁は安定する。

変位解放孔設置後、新凍結領域が経時増加するにつれて、 Δ_1 点の孔縁は外方に変位する。この孔縁変位と、新凍結領域成長による膨張圧、膨張変位などの計算式を導出する。解析では、次の仮定をおく。

1) 地表は太陽熱による加熱の影響をうけるので、タンク周囲の地表部の凍結に影響し、しかも未凍結地盤の地表部の変位は、地表面に解放されるので複雑な挙動を示すであろうが、このような地表効果を無視する。

2) 凍結領域のすぐ外側の未凍結地盤は、すべて弾性的に挙動する²⁾。

3. 地下タンク周囲に凍結領域発生後、変位解放孔を設置する場合の膨張圧、膨張変位および孔縁変位

(1) 凍結による膨張圧と膨張変位の関係式

膨張圧 p と膨張変位 δ の関係は、 $\delta = (\xi_0 + \zeta/p) \{1 - (a/b)^2\} b/2$ で表わされるので¹⁾、膨張圧 p が $\gamma = \theta_0$ で p_0 に変化するときの p_0 に対応する膨張変位 δ_0 は、次式で表わされる。

$$\delta_0 = (\xi_0 + \zeta/p_0) \{1 - (a/b_0)^2\} b_0/2 \quad \text{----- (1)}$$

(2) 変位解放孔設置直後の膨張圧と孔縁変位

凍結領域 $\theta = \theta_0$ のとき、瞬時に変位解放孔を設置すれば、 $\gamma = \theta_0$ 、 l_1 点それぞれ $\Delta p = p_0 - p$ 、 $\Delta\sigma_{r=l_1} = w - \sigma_{r=l_1}$ なる圧力変化が生じる。この圧力変化による $\gamma = \theta_0$ 、 l_1 点の変位 u_1 、 u_2 は次式で表わされる。

$$u_1 = \left\{ (p_0 - p) b_0^2 - (w - \sigma_{r=l_1}) l_1^2 \right\} (1 - \mu) + l_1^2 (p_0 - p - w + \sigma_{r=l_1}) (1 + \mu) \cdot b_0 / E (l_1^2 - b_0^2) \quad \text{----- (2)}$$

$$u_2 = \left\{ (p_0 - p) b_0^2 - (w - \sigma_{r=l_1}) l_1^2 \right\} (1 - \mu) + b_0^2 (p_0 - p - w + \sigma_{r=l_1}) (1 + \mu) \cdot l_1 / E (l_1^2 - b_0^2) \quad \text{----- (3)}$$

$$\text{ここに、} \sigma_{r=l_1} = (p - K_0 \gamma Z) b_0^2 / l_1^2 + K_0 \gamma Z \quad (\text{文献2}) \quad \text{----- (4)}$$

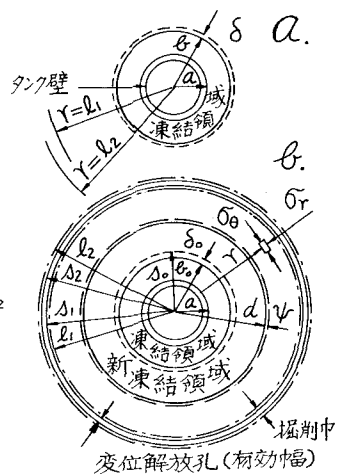


図-1 解析用モデル

a: 変位解放孔設置前の凍結モデル

b: 凍結領域発生後における変位解放孔と新凍結モデル

また、 P は次式の正根である²⁾ $2(1+\mu)p^2 - [2K_0\gamma Z(1+\mu) + \xi_0 E \{1 - (a/b_0)^2\}]p - \zeta E \{1 - (a/b_0)^2\} = 0$ ----- (5)
 実際には、式(1)~(5)の b_0 は、 $a < b_0 < l_1$ である。

δ_0 と δ の差が u_1 に等しい関係から変位解放孔設置直後の P_0 は、次式の正根として表わされる。

$$\frac{\{(1-\mu)\delta_0^2 + (1+\mu)l_1^2\}P_0^2}{l_1^2 - \delta_0^2} - \left[\frac{(1+\mu)l_1^2 P_0^2}{l_1^2 - \delta_0^2} \left\{ P_0 + WZ - K_0\gamma Z - \frac{\delta_0^2}{l_1^2} (P_0 - K_0\gamma Z) \right\} + \frac{1-\mu}{l_1^2 - \delta_0^2} \left\{ WZ - K_0\gamma Z - \frac{\delta_0^2}{l_1^2} (P_0 - K_0\gamma Z) \right\} l_1^2 P_0 + \delta_0^2 P_0^2 \right] - \frac{\zeta E \{1 - (a/b_0)^2\}}{2} P_0 = \frac{\zeta E P}{2} \{1 - (a/b_0)^2\} = 0$$
 ----- (6)

(3) 変位解放孔設置後、新凍結領域の成長による膨張圧と孔縁変位

変位解放孔設置直後の応力状態を初期条件とすると、未凍結地盤内初期主応力 σ_{r0} , $\sigma_{\theta 0}$ は、 $\partial \sigma_r / \partial r + (\sigma_r - \sigma_{\theta}) \times 1/r = 0$ の解に、 $\gamma = b_0 + \delta_0 = \Delta_0$ で $\sigma_{r0} = P_0$, $\gamma = l_1 + u_2 = \Delta_1$ で $\sigma_{r0} = WZ$ なる境界条件を考慮して求められる。新凍結領域の成長に伴う未凍結地盤内の主応力 σ_r , σ_{θ} は、上記と同じ微分方程式の解に、 $\gamma = d$ ($\Delta_0 \leq d$)で $\sigma_r = P$, $\gamma = \Delta_1$ で $\sigma_r = WZ$ なる境界条件を考慮して求められる。したがって、変位解放孔設置後、新凍結領域の成長に伴う未凍結地盤内の応力変化 $\Delta \sigma_r = \sigma_r - \sigma_{r0}$, $\Delta \sigma_{\theta} = \sigma_{\theta} - \sigma_{\theta 0}$ は、次式で表わされる。

$$\frac{\Delta \sigma_r}{\Delta \sigma_{\theta}} = \frac{WZ\Delta_1^2 - Pd^2}{\Delta_1^2 - d^2} - \frac{WZ\Delta_1^2 - P_0\Delta_0^2}{\Delta_1^2 - \Delta_0^2} + \left\{ \frac{(P - WZ)d^2}{\Delta_1^2 - d^2} - \frac{(P_0 - WZ)\Delta_0^2}{\Delta_1^2 - \Delta_0^2} \right\} \frac{\Delta_1^2}{\gamma^2}$$
 ----- (7)

また、新凍結領域が成長すると、膨張変位 ψ と未凍結地盤内の変位の間に次式が成立する。

$$\int_a^{\Delta_1} 2\pi r E_r dr + 2\pi \Delta_1 |u|_{r=\Delta_1} = 2\pi d\psi$$
 ----- (8)

ここへ、 $E_r = (\Delta \sigma_r - \mu \Delta \sigma_{\theta})/E$, $|u|_{r=\Delta_1}$ は孔縁変位であり、 $u > 0$ として

$$u = \left\{ (\mu - 1) \left(\frac{WZ\Delta_1^2 - Pd^2}{\Delta_1^2 - d^2} - \frac{WZ\Delta_1^2 - P_0\Delta_0^2}{\Delta_1^2 - \Delta_0^2} \right) + \left\{ \frac{(P - WZ)d^2}{\Delta_1^2 - d^2} - \frac{(P_0 - WZ)\Delta_0^2}{\Delta_1^2 - \Delta_0^2} \right\} \frac{(1+\mu)\Delta_1^2}{\gamma^2} \right\} \frac{\gamma}{E}$$
 ----- (9)

式(8)を ψ について解くと次のようになる。

$$\psi = \left[\frac{(\mu - 1)(\Delta_1^2 + d^2)}{2} \left(\frac{WZ\Delta_1^2 - Pd^2}{\Delta_1^2 - d^2} - \frac{WZ\Delta_1^2 - P_0\Delta_0^2}{\Delta_1^2 - \Delta_0^2} \right) + \left\{ \frac{(P - WZ)d^2}{\Delta_1^2 - d^2} - \frac{(P_0 - WZ)\Delta_0^2}{\Delta_1^2 - \Delta_0^2} \right\} \left(\ln \frac{\Delta_1}{d} + 1 \right) (1+\mu)\Delta_1^2 \right] \frac{1}{dE}$$
 ----- (10)

膨張圧 P と膨張変位 ψ の関係は、 $\psi = (\xi_0 + \zeta/P) \{1 - (\Delta_0/d)^2\} d/2$ で表わされるので、この ψ と式(10)の ψ を等置すれば、 P の計算式は次式の正根として表わされる。

$$\frac{d^2}{\Delta_1^2 - d^2} \left[(1-\mu)(\Delta_1^2 + d^2) + 2 \left(\ln \frac{\Delta_1}{d} + 1 \right) (1+\mu)\Delta_1^2 \right] P^2 - \left[(1-\mu)(\Delta_1^2 + d^2) \left(\frac{WZ\Delta_1^2}{\Delta_1^2 - d^2} - \frac{WZ\Delta_1^2 - P_0\Delta_0^2}{\Delta_1^2 - \Delta_0^2} \right) + 2\Delta_1^2 \left(\ln \frac{\Delta_1}{d} + 1 \right) (1+\mu) \left\{ \frac{WZd^2}{\Delta_1^2 - d^2} + \frac{(P_0 - WZ)\Delta_0^2}{\Delta_1^2 - \Delta_0^2} \right\} + \xi_0 E (d^2 - \Delta_0^2) \right] P - \zeta E (d^2 - \Delta_0^2) = 0$$
 ----- (11)

経時孔縁変位計算式は、式(9)の γ に Δ_1 を代入して与えられる。

4. 数値計算例 対象タンクは内直径と深さがともに40mで、タンク壁体は厚さ2mの鉄筋コンクリート製でその内側に15cmの発泡ポリウレタン保冷層をとりつけるものとする。計算用土質定数と計算例を下記に示す。

計算用定数	軟弱土	泥岩
単位体積重量 γ (kg/m ³)	1600	1900
弾性係数 E (kg/cm ²)	45	4000
静止土圧係数 K_0	0.667	1.0
ポアソン比 μ	0.4	0.3
凍上試験定数 ξ_0	0.00951	0.00739
凍上試験定数 ζ (kg/cm ²)	0.03378	0.01765
孔内液の比重 w	1.10	
変位解放孔位置 l_1 (m)	38.0	

表-1 計算用定数

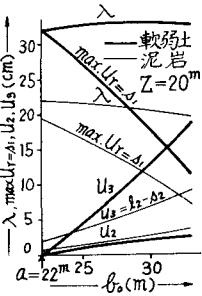


図-2 b_0 と孔半径($\lambda = u_2 + \max\{u_r, u_{r1}, u_3\}$)の関係

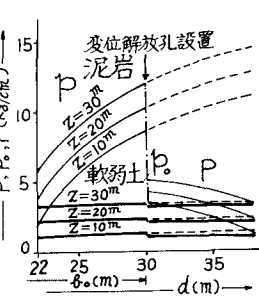


図-3 変位解放孔設置($b_0 = 30$ m)前後の P, P_0, P

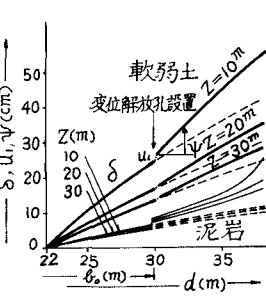


図-4 変位解放孔設置($b_0 = 30$ m)前後の δ, u_1, ψ

- 1) 山田正男：凍結膨張変位の解放による膨張圧力の低減法，才10回土質工学研究発表会，1975
- 2) 山田正男：凍結膨張による未凍結領域内の土圧と変位に関する一考察，才10回土質工学研究発表会，1975