

清水建設㈱土木開発部 正員 川崎広貴
同 上 正員 井畔瑞人
東京瓦斯㈱ 正員 後藤貞雄

1. まえがき LNG地下式貯槽には貯槽周囲にヒーターを設けて凍結土の成長を抑制する形式とヒーターを設けずに凍結土を成長させる形式がある。この場合、設計条件として周囲地盤の変形や凍結土圧などの凍結膨張による影響を知る必要があり、地盤の凍結膨張挙動と地下式貯槽との相互作用を解明する解析法を確立することが重要である。本報告は、凍結膨張に関しては凍結膨張率の実験式を用い、凍結土が温度依存性を有する粘弾性材料と考えられることから、レオロジーモデルを用いて粘弾性現象を表すことにより、地盤の凍結膨張に伴うLNG地下式貯槽の変形と時間経過とともに増加する凍結土圧を数値解析的に明らかにし、定量的に把握しようとするものである。なお、解析は有限要素法を用いて行う。

2. 凍結膨張解析法 地盤の凍結膨張現象は凍結土と未凍結土の境界にある凍結前線の近傍で生じ、単に土中の間げき水が凍るのではなく、未凍結土側から間げき水を吸引しながら（排水する場合もある）凍結するということに特徴がある。高志・生頼・山本¹⁾は開放型凍上試験装置により数多くの実験を行い、凍結膨張が有効応力、凍結速度、間げき水圧に密接な関係のあることに着目し、次の実験式を導いている。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{-\sigma - P\omega} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$P\omega = \frac{n_f \Gamma - (1 + \Gamma) m_v \sigma - \sqrt{\{n_f \Gamma + (1 + \Gamma) m_v \sigma\}^2 + 4 (1 + \Gamma) m_v \sigma_0 \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}}\right)}}{2 (1 + \Gamma) m_v} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ξ ：凍結膨張率、 $\xi_0 \cdot \sigma_0 \cdot U_0$ ：実験定数、 σ ：凍結進行方向の有効応力（圧縮が負）、 U ：凍結速度、

$P\omega$ ：凍結面における間げき水圧、 n_f ：自由水容積含水率、 Γ ：水の体積膨張率、 m_v ：体積圧縮係数

有限要素解析による場合、凍結膨張率を初期ひずみとして扱い、凍結進行方向にのみ作用させる方法が一般的である。また、凍結前線が時間の経過とともに移動し、凍結土領域と未凍結土領域の力学的特性が変化することに対しては有限要素内で考慮する。すなわち、潜熱を考慮した非定常熱伝導解析の結果から得られる任意の時間における凍結前線に沿って要素分割し、凍結前線の移動に合わせて要素の力学特性を未凍結土から凍結土に変換して表現し凍結前線の進行を表す。図-1に1次元で考えた場合の模式図を示す。凍結膨張要素は $t_{i-1} \rightarrow t_i$ まで凍結膨張を起こすものとして時間 t_{m+1} の凍結膨張荷重ベクトル $\{\dot{F}_\xi\}^{m+1}$ を次のように求める。 $\{\dot{F}_\xi\}^{m+1} = \frac{1}{t_\xi} \int_V \{B\}^T \{D\} \{\mathcal{E}_\xi\}^{m+1} dV \dots\dots\dots (3)$

ここに、 t_ξ ：凍結膨張発生時間、 $t_{i-1} \cdot t_i$ ：要素内に凍結前線が入った時の時間と出た時の時間、 $\{\mathcal{E}_\xi\}^{m+1}$ ：時間 t_m による応力から式(1)によって求められた凍結膨張率 ξ を6成分ひずみで表したベクトルである。

3. 温度依存性を有する粘弾性体の応力-ひずみ関係式 粘弾性材料の応力-ひずみ関係が図-2に示される一般化レオロジーモデルで与えられるものとし、各レオロジーモデルのクリープポアソン比は弾性ポアソン比に等しいものと仮定する。また、解析法は堀井・川原²⁾の補助変数を用いた解析法を拡張して用いる。

ばね要素のばね定数を $[E_i(\theta)]$ 、ダッシュポット要素の粘性定数を $[\eta_i(\theta)]$ とする。 θ は温度を表す。各要素は3軸応力状態で次のような応力-ひずみ関係を持っているものとする。 $\{\sigma\} = [E_i(\theta)]\{\epsilon\} \dots\dots\dots (4)$ $\{\sigma\} = [\eta_i(\theta)]\{\dot{\epsilon}\} \dots\dots\dots (5)$

ここに、 $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T$ 、 $\{\epsilon\} = \{\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}^T$ 、 $\dot{\epsilon}$ は時間微分、

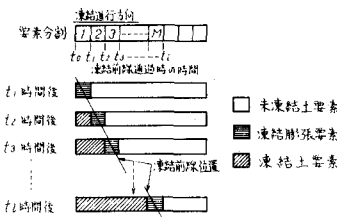


図-1 凍結前線の進行と要素特性

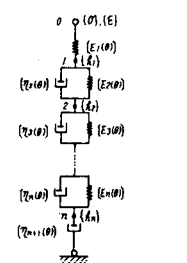


図-2 3軸応力状態の一般化レオロジーモデル

240