

東京瓦斯(株)

丸山隆司

(株)大林組

正員 山下博文

(株)大林組

小川床平

1. まえがき

この報文では、LNG地下式タンクにおけるタンク周辺地盤の凍結現象によって生ずる凍結土圧の解析手法に関する考察を試算例をもとに報告するものである。凍結土圧の解析についてはその基本が¹⁾で示されている。ここではそれを基本としながら更に凍結による吸水現象を解析に考慮したものである。

2. 解析手法の基本構成

凍土の解析は大きく3つの手法に分けて与えられることができる。①凍結面の経時変化を求める蓄熱を考慮した非定常熱伝導解析。②凍結要素の吸水量を求める非定常浸透流解析。③吸水量から定まる膨張率を初期値とみとする非線形応力解析。このうち浸透流解析と応力解析では、連続した現象をステップ解析することで適合させている。解析フローを図-1に示す。

(1) 地盤凍結膨張率

地盤凍結膨張に関しては、基本的に高志等²⁾が提案する式を適用した。

$$\xi = (1 + \rho) \xi_w + \xi_0 + n f \quad (1)$$

$$\xi_w = W/V_0 \quad (2)$$

$$W = \int_{x=0}^{x=t} \frac{dw}{dt} \cdot dt = \frac{1}{u} \int_{x=0}^{x=t} \frac{dw}{dt} \cdot dx \quad (3)$$

ここに、 ξ ；凍結膨張率、 ρ ；土中水の氷結膨張率=0.09、 ξ_w ；吸水率、 ξ_0 ；実験定数、 $n f$ ；自由水容積含水率、 W ；吸水容積、 V_0 ；凍結要素体積、 u ；凍結速度、である。本解析では、非定常浸透流解析における凍結前線の吸水境界条件に以下の式を適用した。

$$\xi_w = \frac{1}{1 + \rho} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} \left(1 + \sqrt{\frac{u_0}{u}} \right) - n f \cdot \frac{\rho}{1 + \rho} \quad (4)$$

ここに、 ρ ；拘束圧、 ρ_0 、 u_0 ；実験定数である。

(2) 地盤定数の非線形性

凍結土については、DUNCAN・CHANが提案した三軸応力状態における応力-ひずみ曲線が示す変形係数の非線形性を適用した。凍土の変形係数については、温度依存性が卓越するものと判断し次式で表わした。

$$E\theta = a + b(\theta + 2) \quad (-2^\circ\text{C} \leq \theta \leq -40^\circ\text{C}) \quad (5)$$

ここに、 $E\theta$ ；凍土の変形係数、 θ ；温度、 a 、 b ；土固有の定数である。

(3) 非定常浸透流解析

一般の解析と同じであり、基礎方程式は(6)式となる。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = C_v \times \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - C_v \times \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad (6)$$

ここに、 P ；間隙水圧、 C_v ；圧密係数 $=k/r_w \cdot m_v$ 、 K ；透水係数、 m_v ；体積圧縮係数である。解析にあたっての境界条件は、①全領域の初期間隙水圧はゼロである。②凍結前線における吸水力は(4)式になる。負の間隙水圧は有効応力の増加と考え拘束圧に加える。③躯体の透水係数はゼロとする。

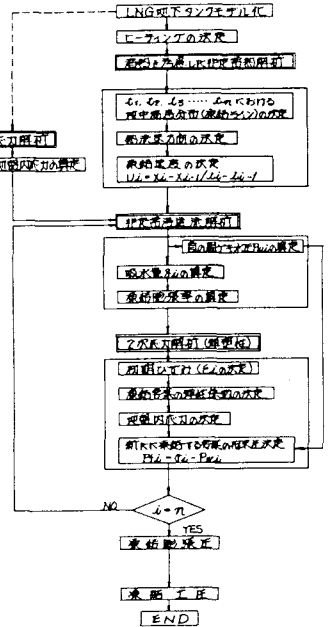


図-1 解析フロー

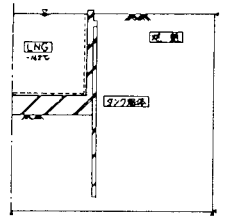
3. モデルタンクの凍結土圧解析

モデルタンクは、凍土の厚さを1mとしその解析モデル図を図-2に示す。地盤定数の一覧表を表-1に示す。凍土の弾性係数は、粘性土と砂質土に単純に分類し図-3に示す値を採用した。

(1) 凍結膨張率

表-1 凍結定数及び未凍土の地盤定数一覧表

土層	S_w	G_s ($\frac{kg}{cm^3}$)	U_s (%)	G_{s-10}	α_f	β ($\frac{1}{cm}$)	C ($\frac{kg}{cm^2}$)	ϕ (cm)	K ($\frac{kg}{cm^2}$)	n	μ
①	0.001	0.001	0	0	0.30	1800	0.3	30	150	0.8	0.8
②	0.002	0.002	300	0.035	0.25	1860	0.3	30	150	0.8	0.8
③	0.001	0.004	150	0.049	0.15	1800	0.5	37	180	0.6	0.8
④	0.005	0.003	40	0.190	0.40	1700	15	15	150	0.6	0.96
⑤	0.006	0.060	5	0.154	0.15	1700	18	15	200	0.5	0.95
⑥	0.0005	0.002	700	0.053	0.25	1800	0.5	35	180	0.6	0.8
⑦	0.004	0.025	30	0.137	0.30	1800	1.7	12	250	0.6	0.95



膨張量の経時変化を図-4に、負の間隙水圧の経時変化を図-5に示す。凍結膨張率の算定にあたっては、負の間隙水圧を有効応力の増加と考えた。そのため拘束圧が増加し、凍結膨張率は負の間隙水圧を考慮しない場合より小さい。

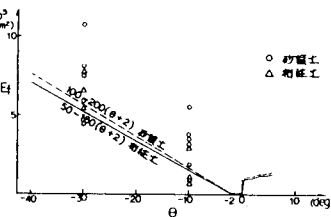


図-2 解析モデル図

(2) 構造物-地盤連成系応力解析

解析にあたっては構造物の挙動が拘束圧を通じて凍結土圧に影響を及ぼすため、構造物と地盤との連成モデルとした。

図-3 凍土の弾性係数

応力解析の結果を図-6, 7, 8に示した。ここで躯体に接する凍土要素の応力も凍結土圧とし、凍土領域の外周に接する地盤の応力も凍結膨張圧とする。凍結土圧(図-7の実線)はFEMによるステップ解析に起因すると思われる誤差が影響してか、その値が変動しているが、凍結膨張圧を、凍土外周面に作用する外圧と考えて応力解析した結果得られる凍結土圧(図-7の点線)は、ある滑りひずみを示した。

言及した後者は凍結土圧と扱うべきであろう。また解析では工層毎の膨張率に差異があること、重複体モデルにも関連して部分的に引張の凍結土圧が生じた。

4. まとめ

本解析は、地盤凍結の吸水現象に非定常浸透流解析を適用し凍土の吸水量を経時歴的に求めて凍結膨張率も決定し、さらに負の間隙水圧を拘束圧に加味した図-6変位図なのである。この考え方によれば、浸透流を考慮しない場合よりも、 γ (凍結膨張率)が減少する。

今後は凍結土圧も正確に把握するために、クリーンと脱氷圧密現象を加味した長期地盤変形に応力解析手法の開発と実験タンクの実験値による検証を行いたい。

参考文献 1) 日本瓦斯協会; LNG地下式貯蔵施設, 昭和54年3月 2) 高志, 他; 凍土に及ぼす未凍結土内の事故抵抗の影響, 雪氷 33巻1号 3) 高志, 他; 凍結中の間隙水圧算定による凍土力の推定 第15回土質工学研究発表会

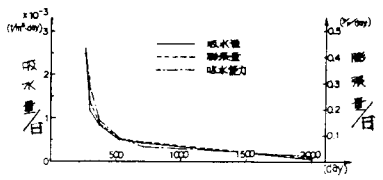


図-4 吸水量と膨張量の経時変化

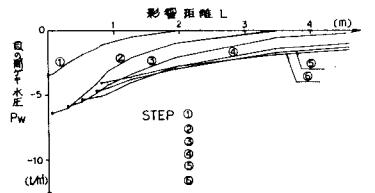


図-5 負の間隙水圧の経時変化

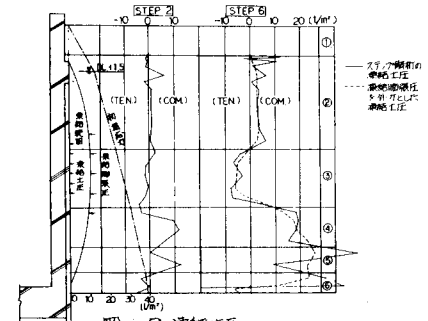


図-7 凍結土圧

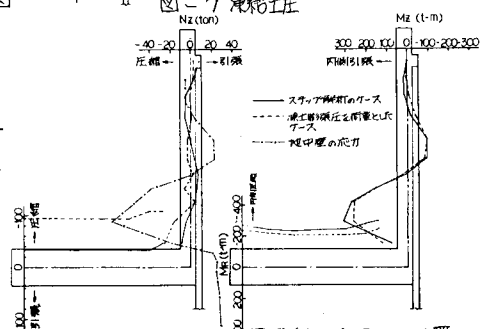


図-8 躯体底版のN/M図