

Ⅲ - B313

遠心模型試験装置を用いたLNG地下式貯槽の凍結土圧に関する研究(その2)

—試験結果およびシミュレーション結果—

(株) 竹中工務店 正会員 甲村雄一*

(株) 竹中土木 正会員 白井克己**

(株) 竹中工務店 正会員 鈴木吉夫* 上田貴夫***

1. はじめに

本研究では、遠心模型試験によりLNG地下式貯槽周辺に発生する凍結土圧を検討した結果について報告するとともに、凍結土圧の評価を簡易に行うことができる二次元円筒モデルを用いて試験結果のシミュレーションを行い、遠心模型試験の結果を考察した結果について報告する。

2. 遠心模型試験による凍結土圧の評価

模型の作製方法、測定機器の配置等は別途報告した文献¹⁾を参照されたい。試験は50Gの遠心加速度場で地盤中央部に設置したアルミ合金製の貯槽内部の温度を-5℃に4時間保つことにより実施し、貯槽周辺の地盤を凍結させた時の地盤の温度分布および土圧の経時変化を測定した。地盤の凍結領域の経時変化を図-1に、また、G.L.-2cm, -14cmおよび-26cmにおける凍結距離の経時変化を図-2に示す。時間の経過とともに凍結領域は広がっていくが、地表面に近いG.L.-2cmでは地盤の凍結は確認されなかった。これは地表面からの入熱の影響によるものと考えられる。また、貯槽外周面から40mm離れた地盤中に設置した土圧計により測定した、試験開始からの土圧の変化量の経時変化を図-3に示す。土圧の値は地盤の凍結の進行にともない増加していくことがわかる。

3. 試験結果のシミュレーション方法

貯槽に作用する凍結土圧は、二次元円筒モデル²⁾では(1)式を用いて求めることができる。

$$P_b = P_x \frac{2}{(1+\nu_t) + (1-\nu_t) \left\{ \left(\frac{b}{R} \right)^2 + \frac{E_t}{E_c} \frac{R^2 - b^2}{b^2 - a^2} \left[(1-\nu_c) \left(\frac{b}{R} \right)^2 + (1+\nu_c) \left(\frac{a}{R} \right)^2 \right] \right\}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P_b : 凍結土圧(kgf/cm²)、 P_x : 凍結膨張圧(kgf/cm²)、 a : 貯槽内径(12cm)、 b : 貯槽外径(14cm)、

R : 貯槽中心よりの凍結距離(cm)、 E_c : 貯槽の弾性係数³⁾(703000kgf/cm²)、 E_f : 凍土の弾性

係数⁴⁾(14700kgf/cm²)、 ν_c : 貯槽のポアソン比(0.35)、 ν_f : 凍土のポアソン比(0.35)

(1)式における凍結膨張圧 P_x は凍結面に作用する有効応力であり、(2)式により求められる²⁾。

$$P_x = G \cdot \xi \cdot \{1 - (b/R)^2\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 G : 地盤のせん断剛性($G = E_s/2(1+\nu)$ kgf/cm²)、 ξ : 凍結膨張率、 E_s : 地盤の弾性係数(kgf/cm²)

文献-1で述べたように G の値は地盤の応力状態に、また、 ξ の値は地盤の応力状態および凍結速度に依存する¹⁾。地盤の応力の値は(2)式で示した凍結膨張圧の発生にともなって変化し、また、凍結速度は時間の経過とともに変化する。本研究では、このような応力状態や凍結速度の変化にともなう地盤の物性値の変化を考慮して凍結土圧を求めるために、試験開始から終了までをいくつかのステップに分割した増分解析を行うこととした。すなわち、1ステップ目では地盤の初期応力に応じた G および ξ を用いて凍結膨張圧を計算し、2ステップ目では1ステップ目で計算された凍結膨張圧分だけ応力が変化した場合の G および ξ を用いて凍結膨張圧を計算するという手順を順次繰り返していくことにより凍結土圧を解析した。なお、 ξ の値は地盤の凍結速度にも依存するが、凍結速度は遠心模型試験で得られた地盤温度の実測値より、各ステップごとに設定した。

地盤が凍結時に吸水膨脹する場合、未凍結地盤から凍土への水の移動量 ΔV_w は(3)式で求められる。

$$\Delta V_w = V (\xi - \phi_w \times \xi_w) / (1 + \xi_w) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 V : 凍土の凍結前の体積、 ξ : 凍結膨張率、 ϕ_w : 凍土の凍結前の容積含水率、 ξ_w : 水の凍結膨張率(0.09)
未凍結地盤では垂直方向の水の移動が生じないと仮定すると、未凍結地盤は ΔV_w だけ水平方向に収縮する。

キーワード: 遠心模型試験, LNG, 地下式貯槽, 凍結土圧

*〒270-13 千葉県印西市大塚1-5-1 (株)竹中工務店 技術研究所

TEL 0476-47-1700 FAX 0476-47-3070

**〒104 東京都中央区銀座8-21-1 (株)竹中土木 技術本部

TEL 03-3542-6321 FAX 03-3248-6545

***〒104 東京都中央区銀座8-21-1 (株)竹中工務店 エネキ・エンジニアリング本部

TEL 03-3542-7100 FAX 03-3542-6855

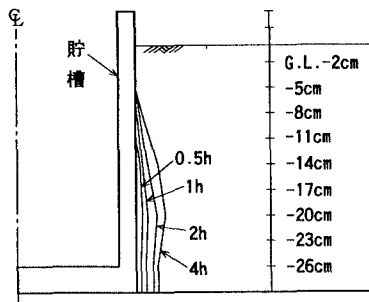


図-1 凍結領域の経時変化

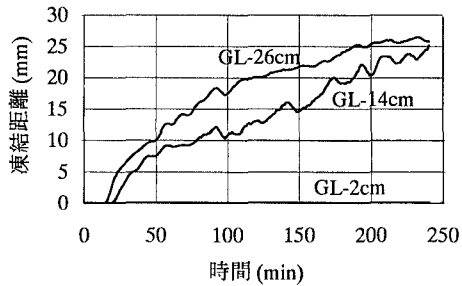


図-2 凍結距離の経時変化

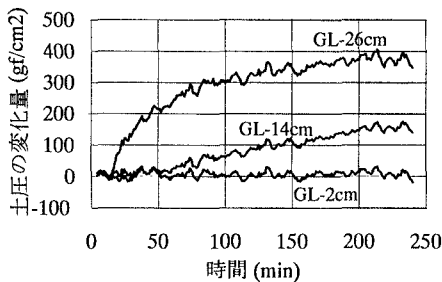


図-3 土圧計出力の経時変化

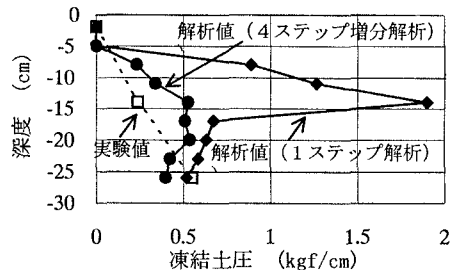


図-4 試験終了時における凍結土圧

すなわち、未凍土の収縮を考慮しない場合には凍結土圧の解析値は実際の値よりも大きく評価することになると考えられる。よって本研究では未凍結地盤の収縮を考慮した見かけの凍結膨張率 ξ' を(4)式で求め、 ξ' を用いて凍結土圧を算定することとした。

$$\xi' = (V - \Delta V_w) / V = \xi - (\xi - \phi_w \times \xi_w) / (1 + \xi_w) \quad \cdots \cdots (4)$$

4. シミュレーション結果および考察

遠心模型試験終了時における凍結土圧を図-4に示す。図には試験終了時までを4つのステップ(0.5時間後、1時間後、2時間後および試験終了時(4時間後))に分割して増分解析した解析値、ステップ分割を行わず試験開始から終了までを1ステップとして解析した解析値および遠心模型試験によって得られた地盤中の土圧の変化量から凍結土圧を求めた結果をあわせて示した。試験開始から終了までを1ステップとして求めた凍結土圧と比較して、4ステップに分割した増分解析の結果は小さな値となり、実験値とオーダ一的に一致することがわかる。このことから、二次元円筒モデルを用いる場合には、時間の経過にともなう物性値の変化を考慮した増分解析を行うことで、凍結土圧を精度よく評価できることがわかる。増分解析の結果と実験値を比較すると、深度の浅い領域では解析値の方が値が大きく、また、深い領域では実験値の方が大きい。この原因として、水の移動にともない未凍結地盤の間隙水圧が変化することが考えられる。すなわち、深度の浅い領域では凍結膨張率が大きく吸水膨脹するために、凍結面で間隙水圧が低下し凍結面付近の未凍結地盤の間隙水圧が低下する。遠心模型試験では全土圧の変化量を測定したため間隙水圧の低下も測定値に含まれ、このような結果が得られたものと推察される。一方、深度の深い領域では凍結膨張率が小さく排水膨脹するために、凍土から未凍結地盤へ水の移動が生じ、その結果凍結面付近の未凍結地盤の間隙水圧が上昇するためこのような結果が得られたものと推察される。

5. おわりに

本研究では、遠心模型試験時に得られた凍結土圧を報告するとともに、二次元円筒モデルを用いて実験結果をシミュレーションした結果について報告した。その結果、時間の経過にともなう物性値の変化を考慮した増分解析を行った場合には解析値は実験値とオーダ一的に一致し、凍結土圧を精度よく評価できることがわかった。

参考文献

- 1) 鈴木他：遠心模型試験装置を用いたLNG地下式貯槽の凍結土圧に関する研究(その1)，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，1997。
- 2) 土質工学会編：土の凍結—その理論と実際—，(社)土質工学会，pp.296-301，1994。
- 3) 国立天文台編：理科年表，p.444，1991。
- 4) 甲村他：第31回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1355～1356，1996。