

Ⅲ - B311

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)

—模型地盤の作成方法および地盤の物性値—

(株)竹中土木 正会員 白井克己*

(株)竹中工務店 正会員 甲村雄一** 鈴木吉夫** 上田貴夫***

1. はじめに

LNG地下式貯槽の周辺地盤はLNGの冷熱の影響により凍結し膨張する。この際、貯槽周囲の凍土はその外側の未凍結地盤へ向かって膨張するために未凍結地盤には応力が発生し、この反力が貯槽に凍結土圧として作用する。本研究では、遠心模型試験装置を用いてLNG地下式貯槽に作用する凍結土圧を実験的に評価する場合の模型地盤の作製方法について検討する。

2. 遠心模型試験の特徴

凍結土圧を解析的に評価する手法には、厚肉円筒理論を用いた二次元円筒モデルやFEMによる方法が提案されている¹⁾。解析的な評価にあたっては、土の凍結膨張特性等の物性値を正確に評価することが必要となるが、土の凍結膨張時のメカニズムなど明らかにされていない現象も多く、解析結果の妥当性を評価する目的で小規模な模型による実証試験を行った研究が報告されている^{2)・3)}。地盤の凍結膨張率等は地盤に作用する応力状態によって大きく異なるため、実規模の貯槽に作用する凍結土圧は深度方向で大きく異なることが予想される。しかし、小規模の模型試験ではこのような深度方向の物性値の違いを考慮した試験は難しい。本研究では、遠心模型試験装置を用いることで、地盤内応力が実大貯槽規模の値に近く、かつ、深度によって地盤の物性値や応力状態が異なる状態を再現して凍結土圧の評価を行う。遠心模型試験における相似則を表-1に示す。遠心加速度場における試験では、土の凍結に関する時間の相似比がすべて一致する特徴がある。

3. 模型の作製方法および模型地盤の詳細

試験に用いた模型の寸法および計測機器の設置位置の詳細を図-1に示す。模型は内径150cm、高さ50cmの鋼製円形土槽、土槽中央部に設置したアルミ合金製の貯槽、地盤等で構成されている。地盤は含水比90%に調整したカオリンペーストを土槽に充填し、1G($G=980\text{ cm/sec}^2$)の重力場で2週間自重圧密した後、50Gの遠心加速度場でさらに10時間自重圧密させて正規圧密状態に作製した。模型地盤中には温度測定用の熱電対を36点、凍結土圧測定用の土圧計(受圧面直径6mm)を貯槽外面から40mm離して3深度に設置した。

モデル地盤は3回作製した。地盤の深度別の含水比分布を図-2に示す。50Gの遠心加速度場で自重圧密させて地盤を作製した後、1Gに戻した状態で試料を採取して含水比の測定を行ったが、深度が深いほど含水比は小さくなった。飽和度 $S_r=100\%$ 、土粒子の密度 $G_s=2.71 \times 10^{-3}\text{ kgf/cm}^3$ として含水比(図-2)より地盤の単位体

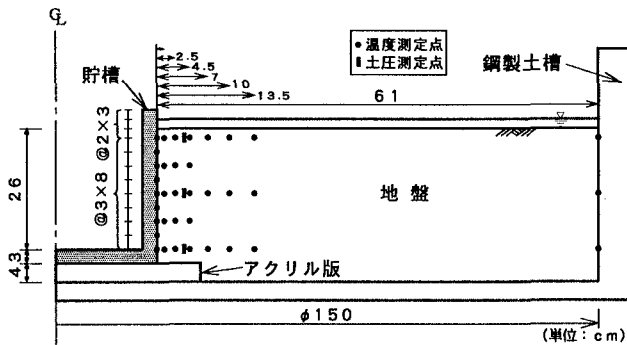


図-1 模型の寸法および計測機器配置図

表-1 遠心模型試験における相似則

物理量	実物	模型
長さ, 変位	1	$1/N$
加速度		N
質量		$1/N^3$
力		$1/N^2$
密度, 応力, ひずみ		1
時間	浸透流	$1/N^2$
	熱伝導	
	凍結速度	

キーワード: 遠心模型試験, LNG, 地下式貯槽, 凍結土圧

*〒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

**〒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)竹中工務店 エネルギー・エンジニアリング本部 TEL 03-3542-7100 FAX 03-3542-6855

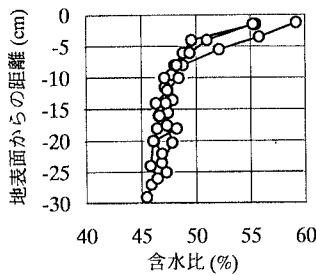


図-2 地盤の含水比分布

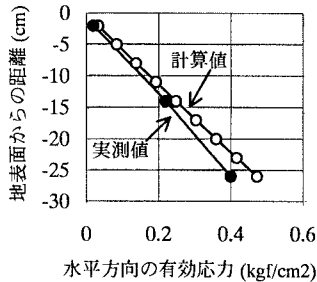


図-3 地盤の水平方向の有効応力

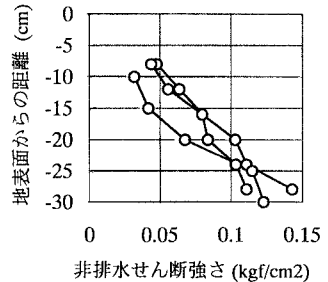


図-4 地盤の非排水せん断強さ

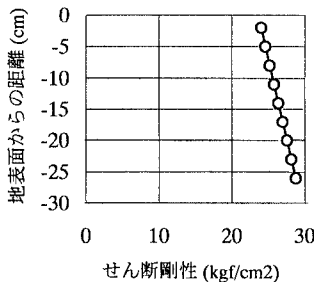


図-5 地盤のせん断剛性

表-2 地盤の凍結膨張率（％）

凍結速度 (mm/h)	～4	4～5	6～8	8～10	10～
拘束応力 (kgf/cm²)					
～0.2	30	20	12	9	9
0.2～0.3	46	30	20	12	12
0.3～0.4	43	10	6	5	4
0.4～0.5	25	8	5	4	3
0.5～	6	5	4	3	2

積重量を求め、(1)式により遠心加速度場での模型地盤の水平方向の有効応力 σ_h' を求めた結果を図-3に示す。

$$\sigma_h' = n \cdot K_0 \cdot \gamma' \cdot H \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 n ：遠心加速度($n=50G$)、 K_0 ：静止土圧係数(0.5とした)、 γ' ：水中単位体積重量(kgf/cm^3)、

H ：地表面からの距離(cm)

図には遠心加速度場での圧密時に、地盤中に設置した土圧計で測定した水平方向の全土圧の値から、深度に応じた水压を差し引いて有効応力を求めた結果もあわせて示したが、両者の値はよく一致している。ベーン試験により模型地盤の非排水せん断強さを求めた結果を図-4に示す。非排水せん断強さは深度に比例して値が大きくなっている。これらの結果から、模型地盤は正規圧密状態にあると判断した。凍結面に生じる凍結膨張圧 P_x は二次元円筒モデルによると(2)式で求めることができる¹⁾。

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

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

b ：貯槽外半径(cm)、 R ：貯槽中心よりの凍結距離(cm)、 ν ：地盤のポアソン比(0.35とした)

凍結距離が小さい場合には、貯槽の壁面に作用する凍結土圧は凍結膨張圧にほぼ等しくなり、凍結土圧の値は G および ξ の値に比例する。 G は、カオリンの三軸圧縮試験(CU試験)で得られた弾性係数 E_s と供試体作製時の圧密応力 σ_s の $E_s = 29\sigma_s + 64$ という関係から、模型地盤の各深度ごとの σ_h' を用いて E_s を求め、ポアソン比を0.35として図-5に示すように設定した。地盤の凍結膨張率 ξ は開式の凍結膨張試験を実施して、表-2に示すように拘束応力および凍結速度ごとに設定した。これらの結果から、遠心模型試験に用いる模型地盤は実地盤と同様に深度によって応力状態や地盤の物性値が異なる状態を再現できることがわかった。

4. おわりに

本研究では、遠心模型試験装置を用いてLNG地下式貯槽に作用する凍結土圧を実験的に評価する場合の模型の作製方法および模型地盤の物性値について検討した。試験結果ならびに試験結果の解析的な検討結果については別途報告する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 中沢 他：第11回土質工学研究発表会発表講演集，pp.889-892，1976.
- 3) 福田 他：第17回土質工学研究発表会発表講演集 pp.557-560，1982.