

## LNG 地下式貯槽底版の熱伝導および熱応力について

長澤 保紀

佐藤 正義  
(土木開発部)中 沢 亨  
(土木開発部)

## § 1. はじめに

LNG 地下式貯槽は地上式のものに比較して安全性・環境との調和という点で優れており、大都市近郊のエネルギー源として近年数多く建設されているが、その内容物が $-162^{\circ}\text{C}$ という超低温であるため、従来の土木構造物とは異なった技術的問題が生じる。すなわち、コンクリート・鉄筋の超低温下における材料特性の変化や、コンクリートの内外面に生じる温度差による熱応力、周辺地盤の凍結による凍結土圧が発生するなどの問題が生じる。これらの問題について、室内試験では多くの報告がなされているが、実貯槽における報告はいまだ例をみない。そこで、実貯槽の熱応力・凍結土圧による挙動を把握し、今後の設計資料とするため、また貯槽の運転管理における安全性確認のチェックデータを得ることを目的として、LNG 地下式貯槽の底版および周辺地盤に種々の計器を埋設して、昭和51年10月から今日まで計測を実施している。

本報では、昭和54年4月までに得られた測定結果を示すとともに、底版の熱応力挙動を把握するため熱伝導解析および熱応力解析を行ない、測定値との比較検討を行った。

## § 2. 貯槽の概要および計器埋設位置

計測を実施している貯槽は、図-1に示すように内径64m、液深18.7m、内容量60,000klの鉄筋コンクリート製の円筒形の低温地下式貯槽である。低温貯槽としての保温は断熱材にて行ない、液密性はメンブレンで保たれる。側部は連続地下壁逆巻き工法で構築された厚さ1.8mの側壁で、底部は貯槽完成後に作用する地下水圧や地盤の凍結土圧に抵抗する強度版型でその厚さは5.5mである。

貯槽周辺地盤における土層の構成は、図-1に示すよ

うに、地表面GL $\pm 0\text{m}$ からGL-13.7mまでは砂とシルトが互層となった軟弱埋立層( $F_s/F_o$ )、または沖積層( $A_s/A_o$ )であり、GL-13.7m以深は洪積層で、GL-13.7mからGL-22.6mはかなり硬い洪積砂層( $D_{s1}$ )で貯槽の支持地盤であり、GL-22.6mからGL-27.4mは洪積シルト層( $D_{e2}$ )で、GL-27.4m以降は洪積シルト層と洪積砂層が互層となっている。

本報で扱った計器は、低温用鉄筋応力計と温度計であり、図-1に示す位置に埋設している。その他にも計器を埋設しているが、それらによる測定値は参考値として扱った。

使用した低温用応力鉄筋計は、温度によってその出力値が変化する特性を有しているため、当社研究所において事前に低温検定試験を実施し、温度による零点移動量曲線を求め、データ処理において測定値の補正を行なった。

## § 3. 温度測定結果と熱伝導解析

## 3.1 LNG 地下式貯槽の温度分布

図-2には、貯槽運転開始後845日後の温度分布を示す。これによると、貯槽側部では $270^{\circ}$ 側よりも $90^{\circ}$ 側のほうが冷熱の伝わり方が早く、側部の凍土の進行状況は方向によって異なっており、その凍土厚さは $90^{\circ}$ 側で約

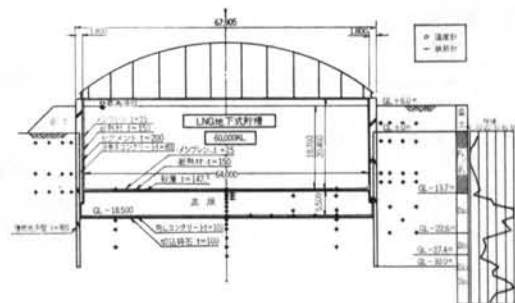


図-1 貯槽概要および計器埋設位置

5.5m, 270°側で約4.6mとなっている。これは、90°側と270°側では図-2に見られるように盛土の形状が異なっている、および土の熱定数が方向によって異なっているなどの理由が考えられる。一方、底部の温度分布は貯槽中心と半径25mの位置においてほとんど差はみられず、底版下地盤は1次元的な熱伝導過程を示している。

### 3.2 熱伝導解析方法

図-2にみられるように、底版および底版下地盤の熱伝導過程は1次元的であると考えられるので、深度方向に詳細に温度測定を実施している底版中央に注目して、有限要素法による土の凍結潜熱を考慮した1次元非定常熱伝導解析を行なった。

熱伝導解析に用いた解析モデルを図-3に示す。解析領域は底版下20mまでの地盤とし、底版上部のメンブレ

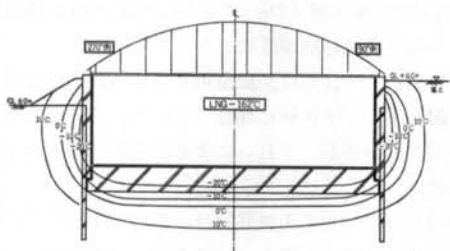


図-2 LNG地下式貯槽の温度分布図  
(貯槽運転開始845日後)

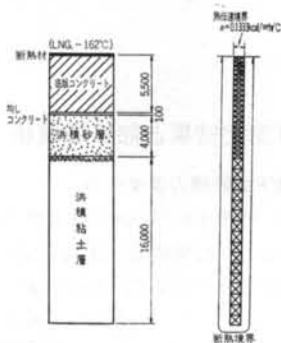


図-3 解析モデル

ン・断熱材・砂層は熱伝達境界に置換え、底版の多段配筋された鉄筋の影響は無視した。

初期条件は全解析領域の温度を17°Cとし、LNGの冷熱の効果は、熱伝達境界より48時間で17°Cから-162°Cまで変化させ、その後は-162°C一定として与えた。解析に用いた熱定数を表-1に示す。

### 3.3 測定結果と解析結果

底版中心および底版中心地盤下の鉛直方向に設置した温度計の測定結果と、熱伝導解析結果を図-4に示す。これによると、底版下地盤が凍結を開始したのは貯槽運転開始300日後で、底版上下の温度差は300日以後ほとんど変化せず、35°C程度である。

測定結果と解析結果は各経日分布ともによく一致しており、LNG地下式貯槽底版の温度分布を推定するには土の凍結潜熱を考慮した非定常熱伝導解析の適用が有効であり、その材料特性値については貯槽建設予定の地盤定数、使用するコンクリート、断熱材に応じて修正することによってよいと考えられる。

## § 4. 底版内熱応力ひずみ分布と熱応力解析

### 4.1 熱応力解析モデル

熱応力解析モデルとして、図-5に示すような周辺単

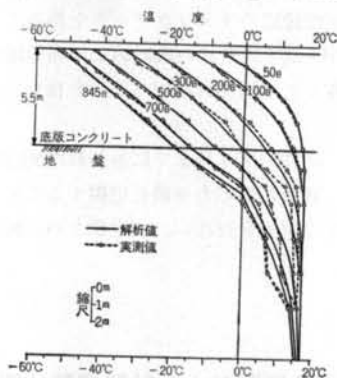
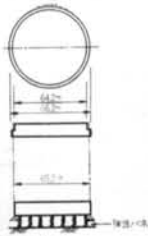


図-4 底版中央部での温度測定結果と解析結果

	熱伝達率 (kcal/m <sup>2</sup> ・h・°C)	比熱 (kcal/kg・°C)	熱容量 (kcal/m <sup>3</sup> ・°C)	熱伝導率 (kcal/m <sup>2</sup> ・h・°C)	凍結潜熱 (kcal/m <sup>3</sup> )
断熱材	0.1333	—	—	—	—
底版コンクリート	—	0.20	480.0	2.00	—
洪積砂層	未凍結	0.42	790.0	1.25	28810.8
	凍結	0.31	587.3	2.12	
洪積粘土層	未凍結	0.52	824.1	1.06	37460.4
	凍結	0.35	560.6	2.01	

表-1 熱伝導解析に用いた熱定数



図一五 熱応力解析モデル

純支持された弾性地盤上の円板を考え、実際の底版と等価な断面剛性ならびに温度分布による断面回転を与えて熱応力解析を行なうことにした。

等価断面剛性および断面回転の算定に当たっては、次のような仮定を設定することとした。

- i) 部材は、全断面有効な複鉄筋コンクリート断面である。
- ii) 完全弾性体であり、断面の平面保持の仮定が成立する。
- iii) 鉄筋の弾性係数 ( $E_s$ ) は  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  とし、コンクリートの弾性係数 ( $E_c$ ) は温度の関数で与える。
- iv) 鉄筋とコンクリートの温度自由収縮ひずみ ( $\epsilon_{sf}$ ,  $\epsilon_{cf}$ ) は、実験データから温度の関数として与える。

上記仮定に基づき、断面に任意の温度分布が作用したときの底版の断面ひずみの変化をみると、図一六に示すひずみ分布変化を示すこととなる。すなわち、初期に一樣な温度 ( $t_0^\circ\text{C}$ , 基準温度) である断面が冷却されて、ある温度分布 ( $t_0^\circ\text{C}$ ) に達したとき、鉄筋およびコンクリートは図一六 (b), (c) に示される温度自由収縮ひずみを生じようとするが、断面の平面保持の仮定により図一六 (d) のようなひずみ分布に変化し、断面が回転する。ところが、地盤のパネ拘束により図一六 (e) に示すひずみ分布に安定させられ、結果として鉄筋およびコンクリートには図一六 (f), (g) に示される応力ひずみが作用することとなる。

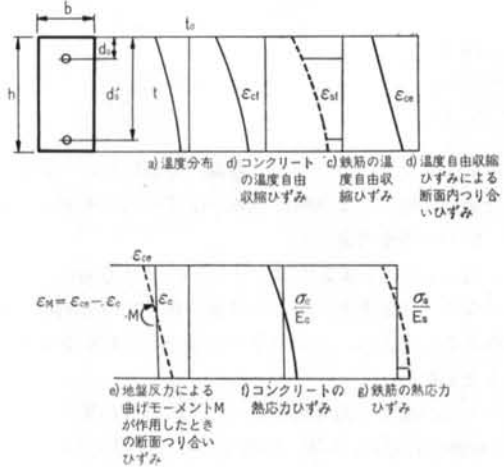
以上の現象をもとに、等価断面剛性および断面回転を式で表わすと以下ようになる。

### 1) 断面回転の算定

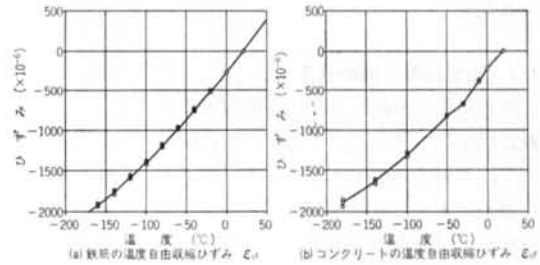
図一六 (d) に示すひずみ分布 ( $\epsilon_{ce}$ ) を  $\epsilon_{ce} = \alpha y + \beta$  とすれば、 $\alpha$  が断面回転角の正接成分であり、力とモーメントのつり合いから次式で算定される。

$$b \int_0^h \{(\alpha y + \beta) - [\epsilon_{cf}(t) - \epsilon_{cf}(t_0)]\} E_c dy + A'_s \{(\alpha d'_s + \beta) - [\epsilon_{sf}(t'_s) - \epsilon_{sf}(t_0)]\} E_s + A_s \{(\alpha d_s + \beta) - [\epsilon_{sf}(t_s) - \epsilon_{sf}(t_0)]\} E_s = 0$$

$$b \int_0^h \{(\alpha y + \beta) - [\epsilon_{cf}(t) - \epsilon_{cf}(t_0)]\} y E_c dy + d'_s A'_s \{(\alpha d'_s + \beta) - [\epsilon_{sf}(t'_s) - \epsilon_{sf}(t_0)]\} E_s$$



図一六 断面ひずみの変化過程



図一七 鉄筋およびコンクリートの温度自由収縮ひずみ

$$+ d_s A_s \{(\alpha d_s + \beta) - [\epsilon_{sf}(t_s) - \epsilon_{sf}(t_0)]\} E_s = 0$$

ここで、 $\epsilon_{cf}(t)$ ,  $\epsilon_{sf}(t)$  は図一七 (a), (b) に示すように今井および石川等の実験データから求めた近似式を採用することとした。また、 $E_c$  は今井の実験結果から得た近似式を採用した。

### 2) 等価断面剛性の算定

ある温度分布が作用する断面に、曲げモーメント  $M$  が作用したときの中立軸距  $x$  は力のつり合いから次式で算定される。

$$x = \frac{b \int_0^h y E_c dy + d_s A_s E_s + d'_s A'_s E_s}{b \int_0^h E_c dy + A_s E_s + A'_s E_s}$$

また、曲げひずみ分布 ( $\epsilon_M$ ) を  $\epsilon_M = \gamma(y-x)$  とおけば、 $\gamma$  はモーメントのつり合いから  $x$  を用いて次式で算定される。

$$\gamma = \frac{M}{A}$$

$$A = b \int_0^h y^2 E_c dy + d_s^2 A_s E_s + d_s'^2 A'_s E_s - x \left\{ b \int_0^h y E_c dy + d_s A_s E_s + d_s' A'_s E_s \right\}$$

ところで、等価断面剛性を  $(EI)_e$  として  $\epsilon_M$  との関係

をみると、

$$\epsilon_M = \frac{M}{(EI)_e} (y-x)$$

$$\therefore (EI)_e = \frac{M}{\gamma} = A$$

以上の算定方法に基づき、各温度分布について算定した等価弾性剛性および断面回転を前述の円板モデルに与え、応力解析を実施した。

各温度分布は、3.2に示したように半径方向に一様であるので、底版中央における温度分布を半径方向に一様に与えることとし、初期の基準温度として17℃を与えることとした。

さらに、地盤反力係数として土質調査結果に基づき1.3 kg/cm<sup>3</sup>に定め、LNG貯蔵によって作用する液圧(平均約6.7 t/m<sup>2</sup>)およびガス圧(約1.2 t/m<sup>2</sup>)を考慮することとした。

#### 4.2 測定結果と解析結果

測定結果と解析結果を比較検討するに当たって、得られた測定値が鉄筋応力であり、解析結果と直接比較できない、地盤の凍結土圧による曲げひずみを分離したい等の理由により、外力モーメントによるコンクリートの曲げひずみに測定値を換算して、解析結果と比較検討を行った。

測定値から得た各測点でのコンクリートの曲げひずみ換算値と、それらの値から推定した底版コンクリートの上縁曲げひずみの経日変化を示すと図-8のようである。

測定値からの換算値と解析結果を、断面のひずみ分布の経日変化として比較すると図-9に示すようであり、両者は非常によく一致している。

また、測定値から推定した上縁ひずみの経日変化を、解析結果と併記すると図-10に示すようであり、底版冷却開始から300日付近まで非常に一致を示している。

300日以降については、3.2でも述べたが、地盤の凍結開始が300日であり、解析結果との差は地盤の凍上圧作用によって生じたものと考えられる。

また、底版の熱応力は解析結果から300日付近をピークとして、それ以降は減少する傾向を有しており、このことは図-7(a)、(b)の温度自由収縮ひずみ曲線の傾向と一致する結果である。

さらに、地盤の凍上圧を図-10の経日変化から推算すると、約0.03 t/m<sup>2</sup>/日で直線的に増加する傾向を示しており、今回検討の対象としている底版において熱応力よりも凍上圧による応力が支配的であり、今後地盤の凍結

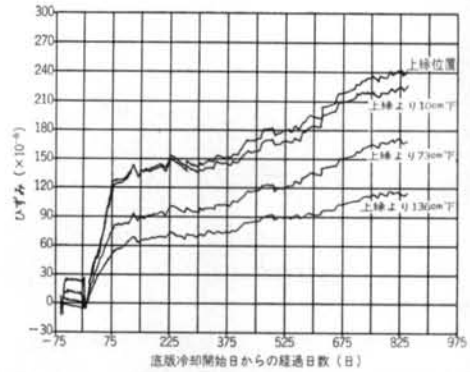


図-8 底版コンクリートの断面応力ひずみの経日変化

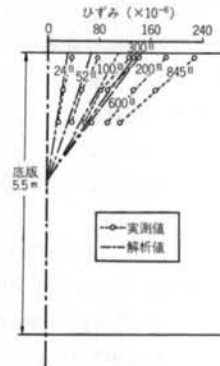


図-9 底版コンクリートの断面応力ひずみの分布

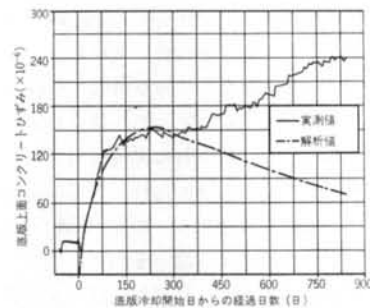


図-10 底版コンクリート上縁ひずみの経日変化

の進行によって底版コンクリート上縁にひび割れが発生するものと考えられる。ただし、0.03 t/m<sup>2</sup>/日は完全弾性体としての推算値であり、コンクリートの応力ひずみ関係から考えると、実際にはそれよりも小さい値で作用しているものと考えられる。

土質柱状図をみると、底版下約4 mまでは洪積砂層(D<sub>e1</sub>層)であり、室内凍上試験の結果ではこの試料の凍上性は小さい。

しかし、対象とした貯槽では厚さ80 cmのSSS壁と洪積シルト層(D<sub>e2</sub>層)で囲まれており、それぞれの透水係数は十分低いことから、上記のような凍上圧の発生に至ったものと考えられる。

## § 5. 結論

昭和51年10月から54年4月までの測定結果について検討を行なった結果、次のことが明らかとなった。

今回対象とした LNG 地下式貯槽の底版および底版下地盤の温度分布およびその経日変化は、地盤・コンクリート・断熱材の熱定数に基づき、かつ土の凍結潜熱を考慮した1次元非定常熱伝導解析によってよく説明することができる。

地盤が凍結を開始するまでの底版内の熱応力は、地盤による拘束を弾性と仮定し、鉄筋およびコンクリートの温度自由収縮ひずみ、コンクリートの弾性係数の温度変化を考慮した弾性解析でよく説明することができる。

今後は、地盤の凍上圧の評価ならびに昭和54年7月から設置された側壁背後のヒーティングパイプの熱的影響、さらには底版コンクリートひびわれ発生後について検討を加える必要がある。次報においては、ヒーティングパイプからの入熱の影響を考慮した熱伝導解析、地盤の凍結による底版の応力解析を実施し、現在までに得られたデータとの比較検討を行なう予定である。

最後に、本測定に御協力をいただき、かつ貴重な資料の提供をいただいた東京瓦斯株式会社、ならびに石川島播磨重工業株式会社に深く感謝の意を表しますとともに、当社工事事務所をはじめとして計画作成・計器検定・埋設工事・測定等に関係された多くの方々に感謝の意を表します。

