

# プレストレスコンクリート製低温液貯槽の 挙動に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL RESEARCH BASED ON THE BEHAVIOUR OF PRESTRESSED TANKS FOR STORING LOW TEMPERATURE LIQUIDS

初崎俊夫\*・貞光誠人\*\*・渡部昭一\*\*\*・三浦 尚\*\*\*\*

By Toshio HATSUZAKI, Makoto SADAMITSU, Shoichi WATABE and Takashi MIURA

A 1/15 to size scale prototype of a PC dual shell tank for Low temperature liquid storage was fabricate.  $LN_2$  was used as a substitute liquid for LNG in conducting trial experiments dealing with cooling, liquid storage failure after the insulation of material and other such similar case types.

In cooling it was demonstrated that the temperature difference was almost doubled at the corner sections.

In addition the prestressing effect due to the differential in liner expansion factors, between the reinforced steel bar and the concrete caused a tensile stress of about 1600  $kgf/cm^2$  in the reinforcing steel bar.

Keywords : prestreste concrete tank

### 1. 序

プレストレストコンクリート（以下PCという）製二重殻低温液貯槽は、常時極低温状態にあるPC低温液貯槽、その外側にあり防液堤機能を有するPC外槽および、内外槽間の保冷材から成り、飛来物等に対する安全性、耐久性はもとより、高価な低温鋼材を使わないため、経済性にも優れた構造物である。

このような構造物においては、低温液貯槽のクールダウン時、貯液時の温度分布、ひずみ、ひびわれ性状、ライニング材の気密性能等に関しては、構造物の形状の影響が大きく、部材実験だけでは推定できない部分がある。また数値解析を行う場合でも、その妥当性を確認するうえで、実用タンクと同じ形状をしたモデルタンクによる実証が必要である。

以上の背景をふまえ、本研究では、実用タンク（8000  $kL$  LNGタンクを想定）の1/15縮尺のプレストレスト

コンクリート製モデルタンクを製作し、LNGの模擬液として、 $LN_2$ を用いて、クールダウン時、ウォームアップ時、貯液時、断熱材異常時を想定した実験を行い、その挙動を調査した。

あわせて、使用した材料の強度特性、温度特性に関する試験を行い、そのデータを用いて数値解析を行って、実験結果と比較検討した。

### 2. 試験方法

使用したモデルタンクの部材厚は、複鉄筋、PC鋼材配置を考慮して、側壁、底板…17 cm、屋根…12 cmとし、また配筋図を図—1に示す。

側壁のプレストレスは円周・鉛直の両方向に与え、円周方向プレストレスは、図—2のように静液圧、ガス圧を打ち消し、余裕圧縮力10  $kgf/cm^2$ が残るように与えた。これは実用タンクで想定しているプレストレス分布（ほぼ三角形分布）とはかなり異なるが、満液時の側壁応力レベルを合わせる目的でこのような分布とした。

鉛直方向は、空液時に円周方向プレストレスにより生じる曲げモーメントに対し、引張応力が生じないようにプレストレスが与えられている。

使用材料および、コンクリートの配合は、表—1, 2に示す。試験体の養生は、養生マットを用いた。その後、

\* 正会員 大成建設株式会社技術研究所首席研究員  
(〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

\*\* 正会員 大成建設株式会社東北支店工事作業所係長  
(〒980 仙台市二日町5-20)

\*\*\* 正会員 大成建設株式会社土木設計部  
(〒160-91 新宿区西新宿1-25-1)

\*\*\*\* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科  
(〒980 仙台市荒巻青葉)

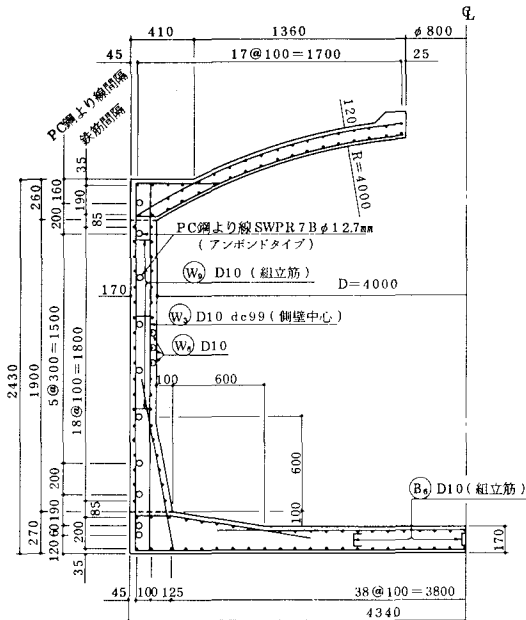


図-1 配筋図

表-1 使用材料

種別	名称	仕様
コンクリート	普通コンクリート	$\sigma_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$ , 最大管材寸法10mm
鉄筋	異形棒鋼	SD35 D10
PC鋼材	円周方向	PC鋼より線 (アンボンドタイプ)
	鉛直方向	PC鋼線
断熱材	発泡ポリスチレンフォーム (スタイロフォーム)	$t = 23 \text{ cm}$ , $\lambda = 0.02 \text{ kcal/mhr}^\circ\text{C}$

表-2 コンクリートの配合

呼び強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (W/C) (%)	細骨材 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						水	セメント	粗骨材	細骨材	混和材
400	10	18±2	4±1	44.0	44.5	194	441	736	932	1103

\* ポリスチレン 70

仮設の屋根を作り、実験まで約2か月間自然放置した。

タンクの外側全体は断熱材で包んだ。使用材料は、定常状態において、コンクリートに大きな内外面温度差を生じさせないこと、ボイルオフガス (B.O.G) 量を最大貯蔵量の4%以下にすることを条件に、LNG船の球形タンクに使用されている厚さ23cmのスタイロ

フォーム (発泡ポリスチレン) とし、このログをタンク外側に巻き付け小口およびすでに巻き終えている下段のログを接着する方法で取り付けた。

試験は、表-3に示すように、冷却条件、内側のライニングの有無等を変えて3回行った。

クールダウンは、タンク内の頂部にリング状に配置したノズルよりLN<sub>2</sub>を噴霧させ、コンクリート内外面に20°C以上の温度差を生じさせないことを条件に、2°C/h, 1.25°C/hの2通り行った。

また、数値解析に用いるデータを得るため表-4に示

表-3 試験条件

回数	断熱材	ライニング材	クールダウン速度	冷却温度	貯液量
第1回	有	無	2.0°C/h	-10.0°C	0
第2回	有	無	1.25°C/h	-14.6°C	8 m <sup>3</sup>
第3回	有	有	1.25°C/h	-19.6°C	24 m <sup>3</sup> (満液)

表-4 使用材料特性試験

試験	強度特性				温度特性			
	圧縮	引張	降伏点	ヤング率	ポアソン比	比熱	熱伝導率	線膨張率
コンクリート	○			○	○	○	○	○
鉄筋		○	○					
PC鋼材	○	○						
断熱材						○	○	○
ライニング材		○		○				

表-5 測定項目と計測システム

測定項目	ゲージ・センサー	計測機器	記録装置
温度	コンクリート断熱材タンク内ガス気	C-C熱電対	万能デジタル測定器 (UCAM-5BT:1台共用)
ひずみ	鉄筋 P-C鋼材	低温用鉄筋ひずみゲージ (KFL-5-C1-11)	万能デジタル測定器 (UCAM-5BT:1台共用)
ひずみ	コンクリート	低温用コンクリートひずみゲージ (KFL-30-350-C1-11)	多点自動切換器 (USB-50A:3台)
時刻		デジタルロック (UCAM-5BT内蔵)	パーソナルコンピュータ (if-800 model 20)
ボイルオフガス量		指示積算型面積流量計	指示計読取
タンク内圧		ブルドン管式圧力計	"
液深		液面制御装置	"
ヒーティング使用電力量		積算電力計	"

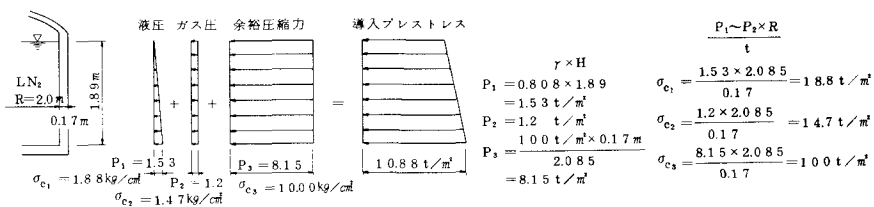


図-2 円周方向プレストレス

すように使用材料の特性試験を行った。

表—5には、本実験の測定項目および計測システムを示す。なお、測定されたひずみは真のひずみを求めるため、使用した低温用ひずみゲージの温度特性値を用いて補正を行った。

3. 試験結果および考察

(1) コンクリートの特性

① コンクリートは、標準養生で  $\sigma_{28}=409 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_c=2.38 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  また、現場養生では、 $\sigma_{28}=369 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_c=2.05 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  であった。

低温時の圧縮強度は文献1)による圧縮強度増加量  $\Delta\sigma_c$  (kgf/cm<sup>2</sup>) とコンクリート含水率  $W$  (%) との近似式

$$\Delta\sigma_c = \left[ 120 - \frac{1}{270}(t+180)^2 \right] \cdot W \dots\dots\dots(1)$$

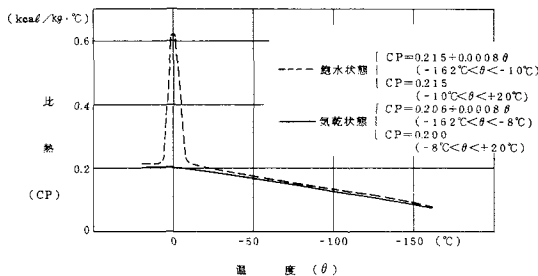
ただし  $\Delta\sigma_c \leq 107 W$ ,  $t$  = コンクリート温度 (°C) によって計算した値とほぼ等しかった。

また、弾性係数は温度が低下するに従って、圧縮強度の増加割合の傾向によく似て増大する。

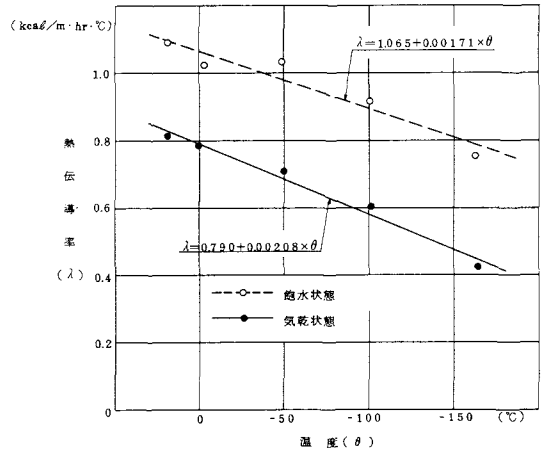
② 比熱は断熱型連続法により、 $\phi 16 \times 30 \text{ mm}$  の供試体を用いて飽水状態および気乾状態 (飽水状態より含水率が約 3.2 % 小さい) の 2 種類の供試体について測定した。

図—3に示すように、飽水状態の供試体は、0°C 付近で水分の凍結の影響により大きなピークが得られているが、-10~-162°C の範囲では、飽水、気乾状態とも温度低下に伴いほぼ直線状に減少している。また、飽水状態の比熱が、気乾状態より 4~6 % 大きな値を示す。ピークが得られる現象は低温から高温に向かって測定する際、コンクリート中の水が溶けることによる吸熱反応によるものと思われる。

文献2)と測定値はほぼ同じ結果となっている。しかし、0°C 付近での大きなピークが得られていないことが相違する。また、凍結前に比べて凍結後の比熱が小さくなるのは、水の比熱が約 1.0 kcal/kg であるのに対して、氷の比熱が約 0.5 kcal/kg と半分になるためと考えられ



図—3 コンクリートの比熱



図—4 コンクリートの熱伝導率

る。

③ 熱伝導率は、JIS A-1413「平板直接法」により測定した値を図—4に示す。飽水状態・気乾状態 (飽水状態より含水率が約 4.7 % 小さい) とともに温度低下に伴って、熱伝導率は減少している。飽水状態の熱伝導率は、気乾状態よりも 30~70 % 大きな値を示す。

文献2)では含水比 2% の試料は同様に、温度低下とともに一様に減少しているが、含水比 7% の試料は温度低下とともに一様に増加しており、図—3に示す傾向と逆の現象を示している。

この相違は、供試体の含水状態により、このような現象を示すものと思われる。また、測定値が一般の値より小さめになっているのは、供試体の含水率が小さいことによるとと思われる。

④ 線膨張係数は、ASTM D 696 の原理に基づく差動トランス法によって、20×20×200 mm の供試体の収縮量を測定し、定常状態になった時点で、温度差および変位量から求めた。

その結果は、気乾状態 (飽水状態より含水率が約 5.5 % 小さい) で  $\alpha = 5.89 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  (-182°C ~ +25°C), 飽水状態で  $\alpha = 5.62 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  (-182°C ~ +25°C) であった。

文献2)の飽水状態の試験結果では温度の低下に伴って、コンクリートが一樣に収縮するのではなく、2つの屈曲点が現われている。ほぼ 0°C でコンクリートの自由水が凍結をはじめ、また -20°C 付近で自由水がほぼ完全に凍結することに対応するものである。

気乾状態においてこのような現象はあまり大きく現われない。したがって上記の測定結果は、このような途中の現象を省略して、一樣に収縮するものとして求めたものである。

(2) 槽の温度分布

a) 冷却時の温度分布

① 断面内温度分布

図-5のクールダウンスケジュールによって冷却したモデルタンクの断面内温度分布は、図-6に示す。

第1回クールダウンは、図-5の折れ線状のクールダウンスケジュールに従って冷却を行ったため、12時間ごとの温度分布が等間隔になっていない。また、その最大間隔および内外面温度差は、第2回クールダウン時に

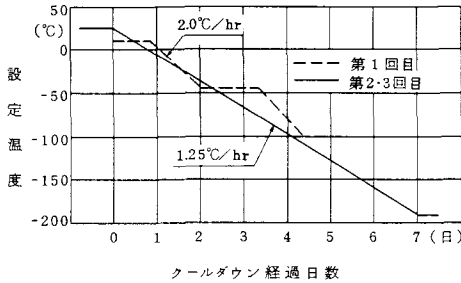


図-5 クールダウンスケジュール

比べて大きくなっており、冷却速度の影響が顕著に現われている。第3回クールダウンは、モデルタンク内面にライニング材(気密バリアー)を取り付けて、第2回クールダウンと同じ冷却速度で行ったが、タンク断面内の冷却速度は、4~6時間遅れており、また、内外面温度差は大きくなっている。

具体的な数値で示すと、次のようになる。

	第1回徐冷	第2回徐冷	第3回徐冷
屋根部の内外温度差	6°C	6°C	9°C
側壁の中間部の温度差	10°C	12°C	15°C
側壁の下端部の温度差	18°C	21°C	28°C
底版の中央の温度差	9°C	14°C	13°C

内外面温度差は側壁の下端部が大きく、第2回徐冷21°Cに対してライニング材を取り付けた第3回徐冷はさらに大きくなり、28°Cになっている。しかし、内側表面にライニング材を取り付けた場合でも、鉄筋のかぶり程度のコンクリートの温度勾配は急になっているが他のコンクリート部分は、第2回クールダウンとほぼ同じ温度勾配になっている。

したがって、ライニング材が断熱材の効果をもつことになり、ライニング材とコンクリートとの温度差が大き

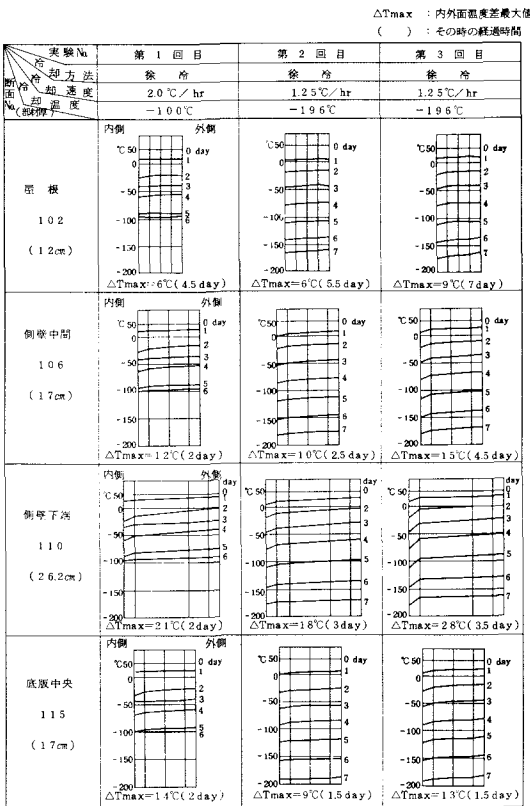


図-6 断面内温度分布

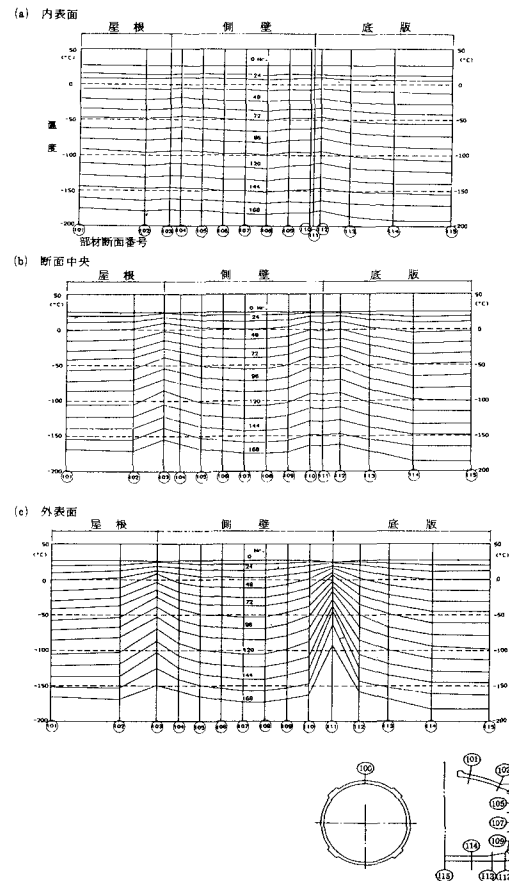


図-7 法線方向温度分布

くなる。ライニング材の設計に際しては、クールダウン時の、この温度差を十分考慮に入れる必要がある。

② 法線方向温度分布

図一七に第3回クールダウン時における内表面・断面中央・外表面の法線方向（屋根および底版は、法線方向、側壁は鉛直方向。以下これを法線方向という）の温度分布を示す。

内表面は全体にほぼ一様に冷えているが、断面中央・外表面になるに従い、部材厚の大きい隅角部(103, 111 断面)において、かなり大きな温度差がついている。

特に、111 断面の外表面は、32 cm 離れた 110 断面と約 70°C (168 時間後)の温度差がついている。温度差が大きくなる隅角部は部材厚が大きく、また、断熱材の継目部分になっており、そこからの入熱が他の部分より多くなって、法線方向の温度差が大きくなったものと思われる。

また、屋根・側壁・底版の相対的な冷え方としては、冷気対流の影響で、底版中心部が最も早く冷えるが、屋根と側壁についてはあまり差がないといえる。

③ 円周方向温度分布

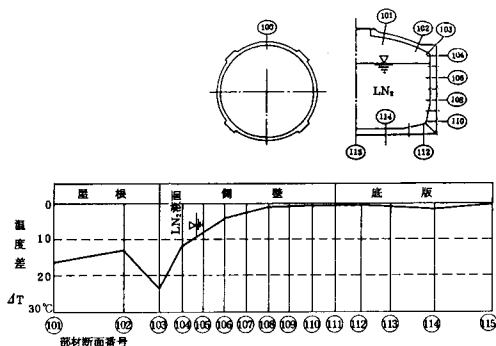
円周方向温度分布は法線方向温度分布と比較すれば、全体にほぼ一様に温度低下している。円周上の4点の温度差としては、ほとんど5°C以内であるが、96時間以降の屋根内表面、168時間における側壁下部の断面中央および外表面が5~9°Cと若干大きめになっている。

これらの温度差は、LN<sub>2</sub>の配管に取り付けたノズル位置にも関係しており、それを改善すれば、もう少し差が小さくなるものと思われる。

b) 定常時の温度分布

第3回クールダウン後、定常状態になった時点(LN<sub>2</sub>受入れ後1週間)での断面内温度分布から求めたコンクリート内外面温度差を図一八に示す。

液面より上の断面(101, 102, 103, 104)では、屋根部およびマンホール断熱材を通しての入熱の影響で、コンクリート内外面温度差がΔT=10°C以上生じており、



図一八 コンクリート内外面温度差

特に部材厚の大きい隅角部(103)ではΔT=24.1°Cとなっている。

液面より下では、屋根部コンクリートから熱伝導により、液深の1/3のところまでは、ΔT=10~1°Cと漸次小さくなっている。それ以下の断面では、ほとんど内外面温度差が生じていない。

温度差の大きい側壁上端の隅角部は、断熱材の継目からの入熱による影響も含まれているものと思われる。また、側壁下部の隅角部では冷却時に、大きな温度差を生じていたが、定常時になるとほとんど生じていないことは、断熱材の継目からの入熱以上にコンクリートが冷却されたものと思われる。

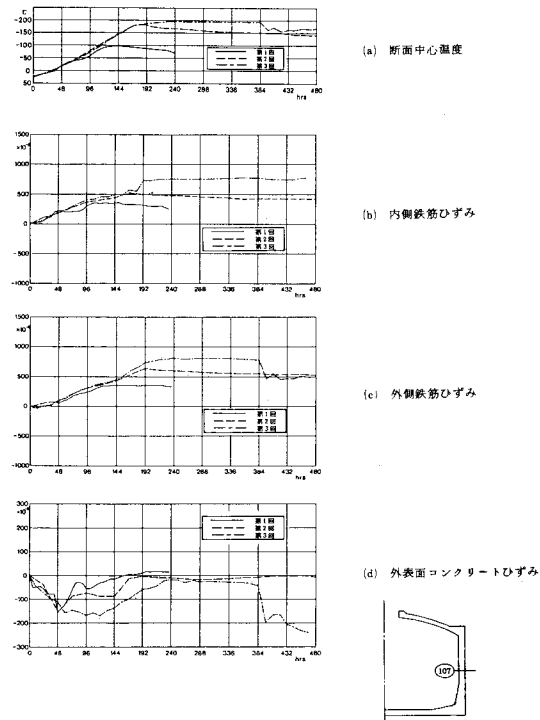
(3) ひずみ変化

第1回目~第3回目実験におけるひずみ変化は、個々の測定値にばらつきがあるものの、全体の傾向としては、冷却に伴うひずみ変化をよく表わしている。ここでは、比較的良好な全体の傾向を示している、側壁中央107断面の鉄筋、コンクリートひずみについて、図一九に示し考察を加える。

a) 鉄筋ひずみ

内側鉄筋ひずみと外側鉄筋ひずみはともに時間の経過すなわち、温度低下に伴いひずみが増加し、クールダウンを停止、または貯液した状態ではほぼ一定になっている。

これは、鉄筋とコンクリートの線膨張係数の違いによ



図一九 107 断面の鉄筋、コンクリートのひずみ変化

るものであり、常温ではほとんど問題にならないこの違いが、極低温になると、大きな鉄筋ひずみとなってくることをよく表わしている。

ピークになった後にひずみの値が、第1回目～第3回目クールダウンで異なるのは、おのおのにおいて、測定点温度が異なるためである。ちなみに第1回目では約-100°C、第3回目では貯液したため-196°C、第2回目では貯液したものの、液面より上であったため約-160°Cであった。このときのひずみの値は、第1回目 300~350 μ、第3回目 700~800 μ、第2回目 450~600 μであり、上記の温度とほぼ比例関係にある。

ここで、線膨張係数差による鉄筋ひずみ  $\epsilon_s$

$$\epsilon_s = \frac{(\alpha_s - \alpha_c)}{1 + P \times N} \times \Delta T \dots\dots\dots (2)$$

$\alpha_s, \alpha_c$  : 鉄筋およびコンクリートの線膨張係数

$\Delta T$  : 常温からの温度降下

$P$  : 鉄筋比

$N$  : 弾性係数比  $\frac{E_s}{E_c}$

から、第3回目における線膨張係数差による鉄筋ひずみを推定すると、

$$\epsilon_s = \frac{(10-6) \times 10^{-6}}{1 + 0.011 \times 3.5} \times 221 = 851 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (3)$$

となり、第3回目の実測値とほぼ一致する。

内側鉄筋ひずみと外側鉄筋ひずみを比較した場合、当然のことながら、内側が冷却速度が早く、したがって初期(0~96 h)におけるひずみ増加率も大きい。しかし、定常状態になれば差はなくなる。

また、第1回目クールダウンでは、図-4のように折れ線状のクールダウンを行っているが、この影響は内側鉄筋によく現われている。外側鉄筋に影響が少ないのは、コンクリートの熱伝導率が大きいためと思われる。

第3回目クールダウンでは、384時間以降、貯液したまま断熱材の一部撤去を行った。107断面は、この撤去した部分の中央の点であり、その影響が外側鉄筋によく現われている。

コンクリート内面は、LN<sub>2</sub>に接したままで温度変化はないが、外表面は外気に接して-82°Cに、外側鉄筋位置でも-130°Cまで上昇している。この結果、外側鉄筋ひずみが約300 μ減少している。

線膨張係数差のみによるひずみとしては、前記の式より、

$$\Delta \epsilon_s = \frac{(10-6) \times 10^{-6}}{1 + 0.011 \times 3.5} \times (190 - 130) = 231 \times 10^{-6} \dots\dots (4)$$

であり、約300 μの減少分には、断熱材撤去に伴うコンクリートの内外面温度差による、局部的変形拘束のひずみも含まれていると思われる。

b) コンクリートひずみ

冷却開始後48時間まで、ほぼ様に圧縮ひずみが生じ、以降は一定または減少している。第2回目、第3回目クールダウンとも貯液時においては、0に近くなっている。これは冷却に従ってコンクリートの内外温度差が大きくなり、内側に引張、外側に圧縮ひずみが生じる。さらに貯液時には、内外温度差が小さくなるとともに、液圧、ガス圧により引張ひずみを生じるためと思われる。

第3回目クールダウンでは、384時間後貯液したまま断熱材の一部を撤去したため、外側鉄筋と同様に圧縮側にひずみが生じている。この値は、約200 μであったから、断熱材を一部撤去した場合でも、タンクに被害を与えるような大きいひずみは発生しないと思われる。

(4) ひびわれ発生状況

第1回目クールダウンは冷却温度が-100°Cであり、LN<sub>2</sub>を貯液しなかったこともあり、ウォームアップ後において、タンク内表面にひびわれは全く観察されなかった。

第2回目では、LN<sub>2</sub>を約8 m<sup>3</sup>(液深約70 cm)貯液し、液面以下の部分では、コンクリートをLN<sub>2</sub>に直接触れさせた。ウォームアップ後のタンク内表面のひびわれ観察では、コンクリート表面の水分が乾燥する直前に、底板中央部で亀甲状の微細ひびわれがみられた。しかし、このひびわれも乾燥後は、ほとんど目視できない程度のものであり、ごく表面だけのものと思われる。

第3回目は、タンク内表面にライニング材を貼り付けたため観察できなかった。ライニング材撤去後においては、接着材をはがした影響で、コンクリート表面は荒れているが、目視できるようなひびわれはなかった。

(5) 数値解析

冷却時の温度分布、ひずみについて実験結果との比較を行うために、有限要素法による熱伝導解析および熱応力解析を行った。解析モデルは、底板中央のX方向、側壁下端のY方向変位を拘束した二次元軸対称モデルとし、要素数(コンクリート207, 鉄筋68, PC鋼材13)288, 節点数241とし、四角形要素を用いた。また解析は第3回目クールダウンを対象として、そのときの温度変化および温度変化によって発生するひずみ等の計算を行った。材料定数は、3.(1)のコンクリート特性試験結果により、表-6の値を用い、また、温度に関する境界条件は、断熱性能結果より、図-10に示す表面熱伝導率  $h_0 \sim h_3$  とする。なお、表-6の熱伝導率は、図-4の飽水状態と気乾状態の中間の値を用いている。

また、 $h_1 \sim h_3$ は文献8)より次のように求めた。

$$h_1 = \left( \frac{1}{h_0} + \frac{t_c}{\lambda_c} + \frac{t_s}{\lambda_s} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{30} + \frac{0.12}{0.6} + \frac{0.2}{0.0111} \right)^{-1}$$

コンク    スタイロ  
リート    フォーム

$$= 0.083 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \dots\dots\dots (5)$$

$$h_2 = \left( \frac{1}{30} + \frac{0.17}{0.6} + \frac{0.23}{0.017} + \frac{0.12}{0.04} \right)^{-1} = 0.059 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

コンク    スタイロ    グラス  
           リート   フォーム   ウール

$$\dots\dots\dots (6)$$

$$h_3 = \left( \frac{1}{9} + \frac{0.17}{0.6} + \frac{0.2}{0.017} \right)^{-1} = 0.082 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

コンク    スタイロ  
           リート   フォーム

$$\dots\dots\dots (7)$$

$h_0$ : 境界熱伝達率  
 外気とスタイロフォーム 30 kcal/m<sup>2</sup>h<sup>°</sup>C  
 基礎スラブとスタイロフォーム 9 kcal/m<sup>2</sup>h<sup>°</sup>C  
 $\lambda$ : 熱伝導率  
 $t$ : コンクリート (C), スタイロフォーム (S) およびグラスウールの厚さ

外気温は、屋根部  $T_1$ , 側部  $T_2$  を実測平均温度 25<sup>°</sup>C, 底部  $T_3$  はヒータを考慮して 15<sup>°</sup>C とする。

タンク内部のガス温度  $T_0$  については、クールダウン時設定温度 (+20<sup>°</sup>C より 1.25<sup>°</sup>C/h でクールダウン) また、貯液時の液面より上のガス温度  $T_0$  は、実測値 -185<sup>°</sup>C を用いた。

a) 熱伝導解析結果  
 クールダウン時 (0~16 時間), 貯液時の温度分布計算結果から断面内温度勾配の経時変化について、実測値

表-6 熱伝導解析用材料定数

項	単位	コンクリート	鉄筋	P C 鋼棒
熱伝導率	$\frac{\text{kcal}}{\text{mhr}^\circ\text{C}}$	$0.928 + 0.0019 \times \theta$	—	—
比熱	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$	$0.21 + 0.0008 \times \theta$	—	—
比重	$\text{kg/m}^3$	2.350	7850	7850
線膨張率	$^\circ\text{C}^{-1}$	$0.6 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$
ヤング率	$\text{kg/cm}^2$	$2.4 \times 10^5$	$2.1 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$
ポアソン比		0.2	0.3	0.3
断面積	$\text{cm}^2/\text{m}$	—	7.133 (D10@100)	4.223 ( $\phi$ 13@299)

$\theta$ : 温度

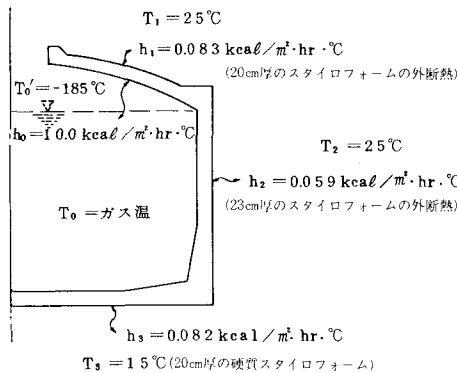


図-10 温度境界条件

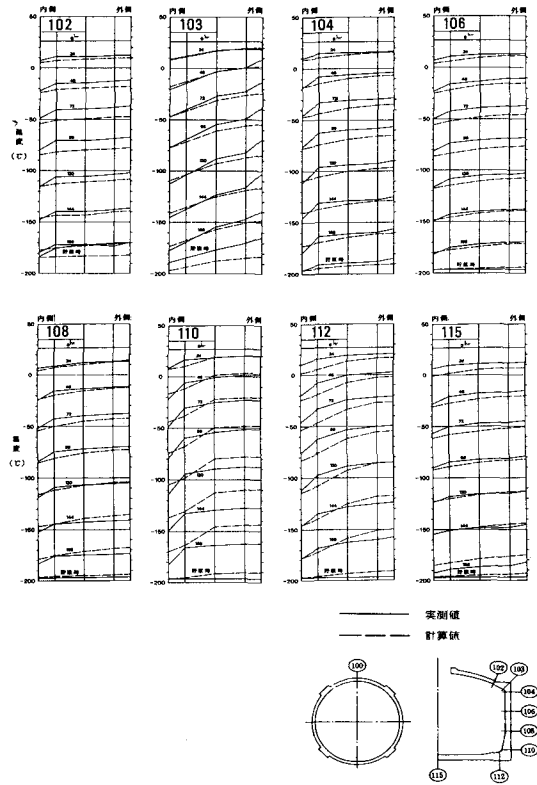


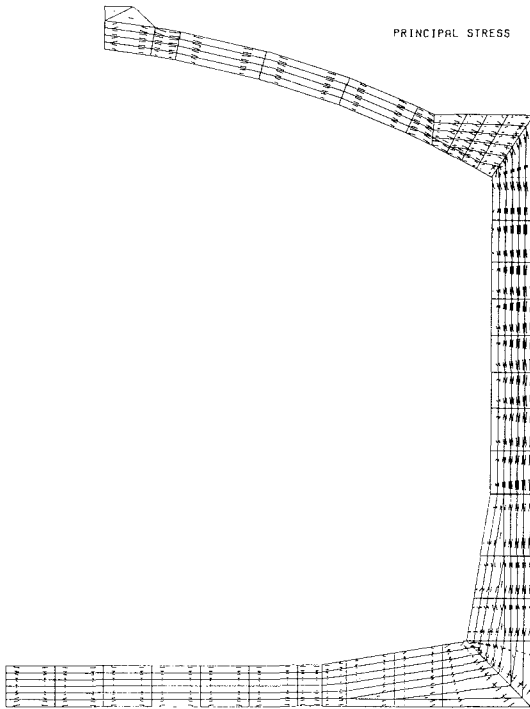
図-11 断面内温度勾配(実測値と計算値の比較)

との比較を行ったものが図-11 である。  
 経時変化に多少のずれがあるが、温度勾配を含め全体に比較的よく一致している。

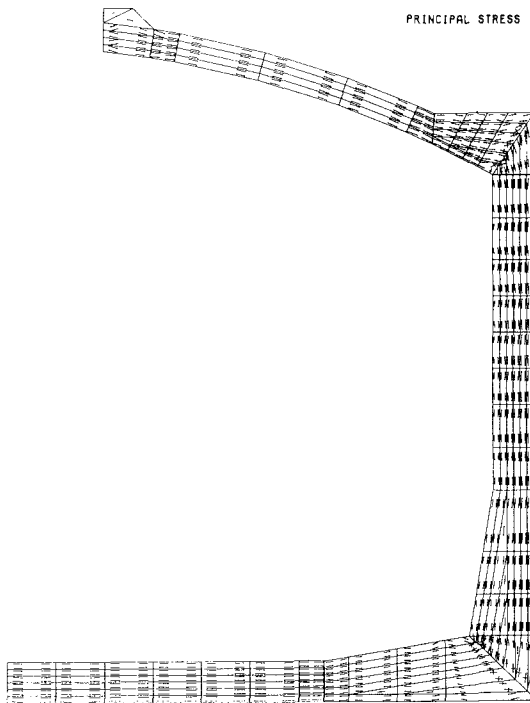
b) 熱応力解析結果  
 クールダウンの途中過程である 120 時間後、および定常状態になった貯液時の温度による変形の解析結果によると 120 時間後は、内外温度差により、底板中央部で 0.4 mm とわずかではあるが、そり変化を生じていた。貯液時になると、この内外温度差がほとんどなくなり、全体にはほぼ一様な収縮をしている。その値は側壁外面の中心方向変位が 2.9 mm, ドーム天端の鉛直方向変位が 3.7 mm で実測値とほぼ一致していた。

168 時間後、および貯液時の温度による主応力分布を図-12, 13 に示す。貯蔵時には内外温度差がほとんどないにもかかわらず、法線方向に全断面圧縮となっている。圧縮応力度の値は 15~25 kg/cm<sup>2</sup> である。この原因はコンクリートより線膨張係数の大きな鉄筋が、同温度のコンクリートより大きく縮もうとするために起きる、いわゆる「プレストレス効果」とよばれるもので、同時に鉄筋には引張応力度が生じている。

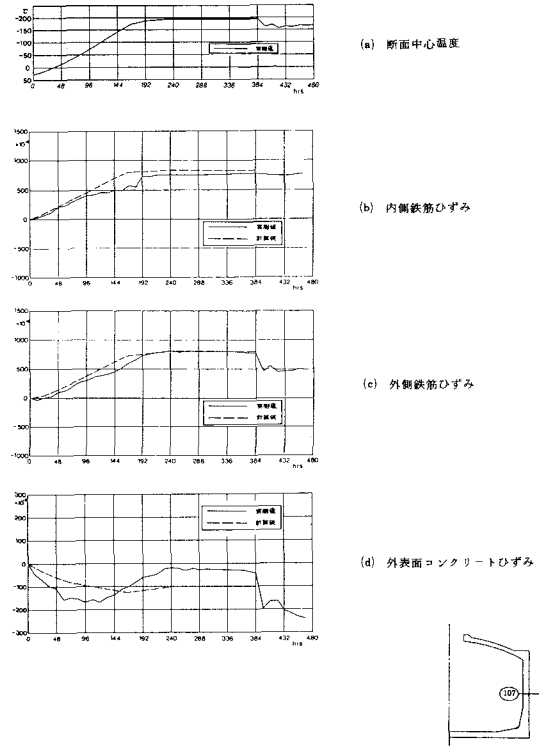
168 時間後では、このプレストレス効果による圧縮応力度とあわせて、内外温度差による曲げ応力度が生じて



図一12 168時間後の温度による主応力分布



図一13 貯液時の温度による主応力分布



図一14 107断面の鉄筋、コンクリートの実測値と計算値の比較

いるため、内側へ行くに従って圧縮応力度が小さくなり、場所によっては内面に引張力度が生じている。

ひずみ実測値の考察を行った107断面について、実測値と解析値（液圧のみ考慮）の比較を行い、その結果を図一14に示す。ヤング率の定数を温度によって変化させた場合の解析結果は一定値を採用した場合より実測値に近づくと思われるが、図一14のように一定値でも十分よい結果を示している。

鉄筋については前述したプレストレス効果により、温度の低下に伴って引張ひずみが増加しており、計算値と実測値はよく一致している。

コンクリートについても、ひずみ自体が鉄筋に比べて小さいこと等を考えると、計算値と実測値は比較的良好に一致しているといえる。

したがって、3.(4)のひびわれ程度であれば、文献4)で示されるように、弾性係数を低減しなくても、有限要素法による弾性解析が適用できるものと思われる。

#### 4. 結 論

低温液貯槽のクールダウン時、貯液時、断熱材異常時を想定した基礎的な研究を行った結果、次のようなことがわかった。



(1) 低温貯槽のクールダウン時、貯液時には、部材厚の大きい隅角部において、断面的に大きな温度差がつくことがわかった。

(2) 常温ではほとんど問題とならない鉄筋とコンクリートの線膨張係数差が、極低温になると大きな鉄筋ひずみとなって現われて、貯液時においては、約  $800 \times 10^{-6}$  の引張ひずみが発生している。

(3) 貯液したまま断熱材の一部を撤去した場合は、すぐにコンクリート表面に霜が付き始め、時間の経過とともに霜が成長し、一種の断熱材の役目を果たすことになり、コンクリートおよび鉄筋には、問題になるようなひずみが発生しない。

(4) 熱伝導解析は、材料定数および境界条件を正しく設定することにより、二次元軸対称モデルの有限要素法で、得られた解析結果が実測値とほぼ一致している。

(5) 熱応力解析はコンクリートの表面の水分が乾燥する直前に亀甲状の微細ひびわれがみられる程度であれば、弾性係数を見掛け上低減しなくても、全断面有効と考え、有限要素法による弾性解析が適用できる。

したがって実際の構造物においても、隅角部の温度差に注意しながら、クールダウンして貯液する方法をとれば、通常の方法定数および境界条件を用いた有限要素法により熱伝導解析、熱応力解析が有効である。さらに極低温になるとコンクリートと鉄筋(PC鋼材を含めて)の線膨張係数差による引張応力が鉄筋に生じる、いわゆるプレストレス効果といえるもので、設計に際しては、

この応力を配慮する必要がある。

謝 辞：本研究は、PC二重殻低温タンクプロジェクトによって実施した結果を報告するものであって、プロジェクトメンバーの皆様には厚くお礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 三浦 尚：極低温下のコンクリートの特性，コンクリート工学，pp.21~28，Vol.22，No.3，March 1984.
- 2) 齊藤二郎・内藤和章・上野孝之・土屋幸三郎：極低温下におけるコンクリートの性質，コンクリート工学，pp.9~16，Vol.14，No.8，Aug. 1976.
- 3) 吉本清史・山本隆治・迎 邦博・宮川 清・板垣敏明：プレストレスコンクリートによるLNG，LPG貯蔵用二次障壁の開発，住友建設技術研究所所報，pp.29~42，1979.
- 4) 青柳征夫：鉄筋コンクリートLNGタンクモデルの熱応力に関する研究，セメント技術年報，pp.37~44，XXX1，昭52.
- 5) 青柳征夫・阿部博俊・金津 努：低温度下における鉄筋コンクリート曲げ部材の力学特性，電力中央研究所報告379015，S.54年12月.
- 6) Evert, Meinen : LNG Storage enclosed in Prestressed Concrete Safety Walls, The Oil and Gas Journal, May 14, 1976.
- 7) Elices, M. : Prestressed Cryogenic Concrete, A review of Testing in Spain : second International Conference on Cryogenic Concrete.
- 8) 渡辺 要：建築計画原論Ⅱ，pp.66~69，丸喜株式会社。(1987.5.19・受付)