

論文 鉄筋コンクリート製 LNG 貯蔵地下タンクの温度応力のクリープ解析

小澤正志*1・大沼博志*2・名和豊春*3

要旨：LNG貯蔵用の鉄筋コンクリート製地下タンクは、その内部に収納されるLNGによって長期間にわたり徐々に冷却される。地下タンクは大断面の厚肉構造物であるので、この温度荷重に対する配筋量は膨大なものとなる。温度荷重に対する設計法としてはコンクリートのひびわれ発生あるいはクリープによる断面剛性の低下を考慮することによって温度応力を合理的に評価することが重要である。本論文は、ひびわれ発生はないものとして、このうち後者のクリープによる応力緩和を検討した。その結果、コンクリートのクリープによって温度応力は大幅に低減することが明らかになった。

キーワード：LNG貯蔵地下タンク、温度応力、極低温、クリープ、応力緩和

1. はじめに

LNGは、天然ガスを大気圧下で-162℃に冷却・液化したものであり、液化工程で不純物が取り除かれるためにクリーンであること、及び液化することによってその体積は気体状態の1/600となるため輸送・貯蔵に便利であることから、近年、火力発電所や都市ガス用にその使用量が飛躍的に増大してきた¹⁾。

LNGの温度は-162℃という極低温である。しかしながら、タンクの内側にはステンレス鋼ないしはアルミニウム製のメンブレンと断熱材が設けられているため、鉄筋コンクリート躯体内表面の温度は、定常時において-70℃程度に保持されている。

LNG貯蔵地下タンクは、極低温のLNGによって徐々に冷却され、その底版、側壁には温度応力が発生する。これらの部材は大断面であるので、温度応力に対する配筋量は大きく、地下タンクの配筋量を支配するほどである。本論文は、コンクリートのクリープを考慮することによって温度応力の低減効果を検討・評価し、地下タンクの経済性の向上を図ることを目的と

している。

2. 有限要素法による解析方法²⁾

2.1 非定常熱伝導解析

回転軸対称構造物の非定常熱伝導を支配する基本方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(rK_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(rK_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + rQ - r\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

境界条件には、境界上で温度が指定される固定境界条件と、表面における熱流速が内部と外表面の温度差に比例するものとする熱伝達境界条件の2種類がある。

(a) 固定境界条件：

$$T = T_A \quad (2)$$

(b) 熱伝達境界条件：

$$rK \left(\frac{\partial T}{\partial N} \right) + rh(T - T_0) = 0 \quad (3)$$

ここで r, Z は座標、 T は温度、 K_r, K_z は r, z 方向の熱伝導率、 t は時間、 Q は内部発熱率、 h は熱伝達率、 ρ は密度、 T_0 は熱伝達面の外気温温度、 c は比熱である。

*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学教授 大学院工学研究科 工博 (正会員)

*3 北海道大学助教授 大学院工学研究科 工博 (正会員)

2.2 クリープ解析

クリープ解析には、クリープ率法を用いた。クリープ率法は、クリープ速度が载荷材令とそれ以前のひずみ履歴には無関係であり、载荷応力 σ 、温度 T 及び载荷後の経過時間 t の関数であるという概念に基づいてクリープひずみ ε_c を求めようとするものである。応力と温度が一定の場合には、クリープ速度が時間と共に減少するので、時間硬化法ともいわれている。

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = f(\sigma, t, T) \quad (4)$$

この方法では、クリープ増分が積分された形でクリープひずみが求まるので、応力履歴と温度履歴を考慮することが可能である。しかし、応力が除去されたときには、減少応力に対するひずみ速度はゼロとなるのでクリープ回復は無視されている。

2.3 解析プログラム

本クリープ解析は、非正常温度状態におけるクリープ解析を行うことができるように、外荷重による応力解析、非正常熱伝導解析、弾性温度応力解析をすべて有限要素法によって行い、これより得られた温度及び応力を用いてクリープ解析を行うものである。解析に用いた計算プログラムの簡単なフローチャートを図-1に示す。

3. 解析モデル及び解析に用いた材料特性

3.1 解析モデル

LNG貯蔵地下タンクの躯体内表面は、断熱のための保冷材と、LNGの液密・気密を確保するためのメンブレンで覆われている。上部はドーム状屋根と吊り天井からなり、天井上には保冷層が設けられている。寸法は、内径が72m、液深が49.2m、底版厚さが10m、側壁厚さが3.2mの構造とした。また、LNGの冷熱による周辺地盤の凍結の影響を避けるためヒーティング設備を設ける場合があり、今回は、底部ならびに側壁まわりをヒーティングするものとした。

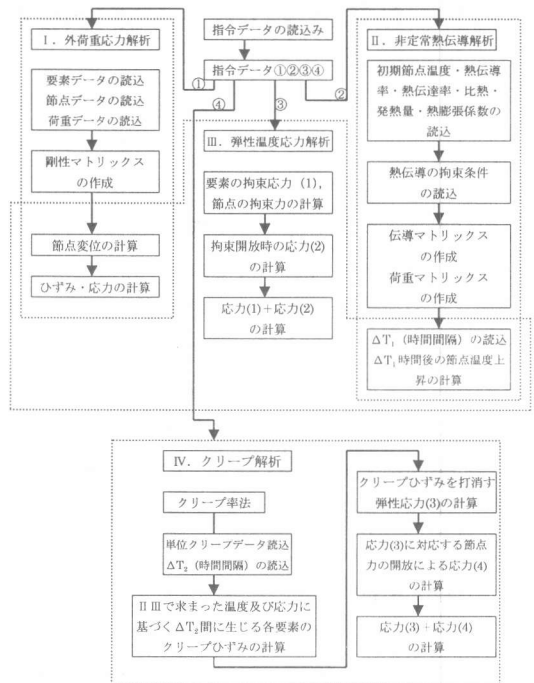


図-1 解析プログラムのフローチャート

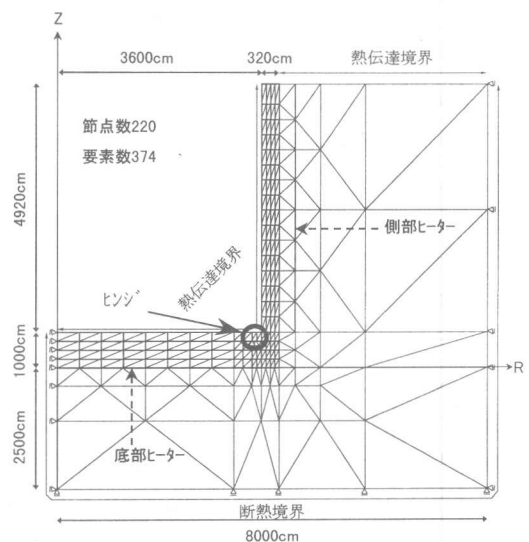


図-2 解析構造体要素分割

LNG貯蔵地下タンク及び周辺地盤の要素分割と境界条件を図-2に示す。側壁と底版の接合部はヒンジ構造とした。境界温度条件は、LNG温度を -162°C とし、コンクリートと地盤の初期温度を 15°C とした。大気温度は 15°C 、ヒ

ーター温度は 15℃に固定した。

作用荷重は、外荷重（土圧、水圧、液圧、ガス圧、屋根荷重）及び温度荷重を考慮する。図-3 に外荷重の分布を示す。外荷重は温度荷重が作用する前にすでに働いており、温度荷重が作用した後も一定に働き続けるものとする。クリープは、温度荷重作用後の時間に対して考慮する。

3.2 解析に用いた材料特性

齊藤ら³⁾の実験によると、W/C=54%、単位セメント量 300kg/m³の湿潤状態のコンクリートにおける熱伝導率は、20℃では約 2.2W/m℃で、温度の低下とともに一様に増加し、-60℃では約 2.6W/m℃となる。しかし、低温時でも 20℃と比べてそれほど変化しないので、今回の解析では 15℃での値を用いた。一方、比熱は、20℃では 1.09kJ/kg℃で、温度の低下とともに減少し、-100℃では 0.50kJ/kg℃となる。そこで、20℃から-80℃までの平均値を用いた。また、コンクリートの温度と収縮ひずみの間には、図-4 に示すような関係がある。直線の勾配を線膨張係数とすると、温度の低下に伴い著しく変化するが、常温での値を用いることにした。

岡田ら⁴⁾の実験によると、W/C=38%~63%の、湿潤状態のコンクリートの強度は低温下において増加し、常温時の圧縮強度を 30.6N/mm²と仮定すると、引張強度は図-5 に示すような関係がある。また、コンクリートのヤング係数は温度依存性を考慮せず、 2.9×10^4 N/mm²の一定値を用いた。

地盤の特性は、温度依存性を考慮せず、一定値であると仮定した。地盤が凍結すると凍土圧が発生し、側壁には圧縮応力が発生するので、周辺地盤の凍結を無視することによって、温度応力を安全に評価することができる。また、地

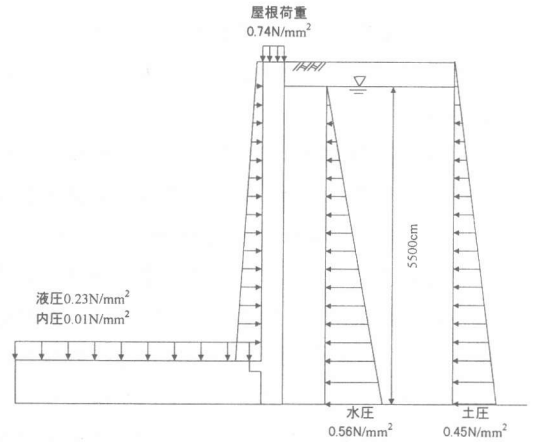


図-3 外荷重分布

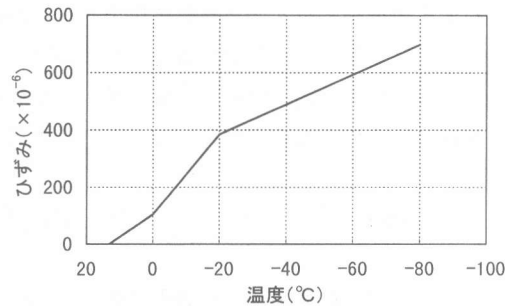


図-4 コンクリートの温度と収縮ひずみ

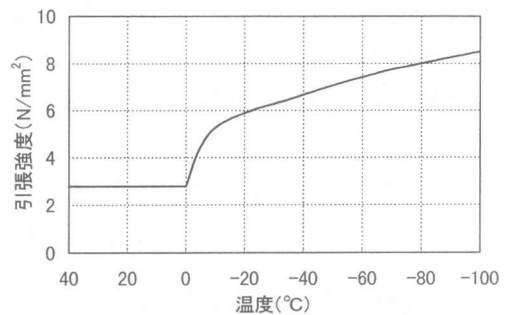


図-5 低温時引張強度

表-1 解析に用いた材料諸定数

	密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (W/m℃)	熱伝達率 (W/m ² ℃)	比熱 (kJ/kg℃)	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	線膨張係数
保冷材		0.0291	0.194				
コンクリート	2.4×10^3	2.3	14.0	0.84	2.9×10^4	0.20	$10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
地盤	2.0×10^3	1.4	11.6	1.67	5.0×10^2	0.30	

盤のヤング率は、密な砂で約 $3.0 \times 10^2 \text{N/mm}^2$ であるが、温度応力を安全に評価するために少し大き目にとった。表-1 に、解析に用いた材料諸定数を示す。

LNG 貯蔵地下タンクに用いられるコンクリートを対象とした 1 軸圧縮クリープ試験から、クリープの温度依存性は、図-6 に示すように、荷重後の経過 70 日における各温度条件のクリープひずみと 20°C のクリープひずみとの相対値によって表示した⁵⁾。この図から、低温下におけるコンクリートのクリープは常温よりも小さく、温度の低下とともに減少することが示された。

また、この一軸圧縮クリープ試験で得られた結果を構造物のクリープ解析に使用するためにはクリープ曲線式に表示することが必要である。いくつかの表示式について実験結果のあてはめを行い、そのうち近似が良いのは次の表次式であった⁵⁾。

$$\varepsilon(t) = \sigma/E_i + A \times \sigma \times [\ln\{(K+t)/K\}]^{1/q} \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon(t)$ は荷重後の経過時間が t 日における弾性ひずみとクリープひずみの和 (10^{-6})、 σ は荷重応力 (N/mm^2)、 E_i はヤング係数 (N/mm^2)、 K は荷重時のコンクリートの材齢 (日)、 A と q は実験定数である。

実験定数の温度依存性は、以下に示すような温度の二次関数によって近似した。

$$A(T) = 1.915 + 1.610 \times 10^{-2} \times T + 0.539 \times 10^{-4} \times T^2 \quad (5)$$

$$q(T) = 3.190 - 1.428 \times 10^{-2} \times T - 1.282 \times 10^{-4} \times T^2 \quad (6)$$

これらの実験定数の回帰式から算定されるクリープ曲線と実験結果との比較の一例として、 -100°C の場合を図-7 に示す⁵⁾。

4. 解析結果とその考察

4.1 非定常温度分布

解析は 100 年後まで行った。図-8 に、側壁

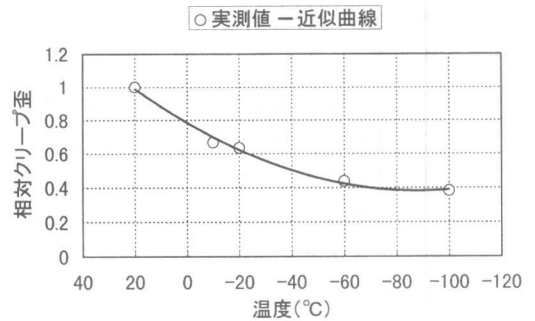


図-6 コンクリートのクリープの温度依存性

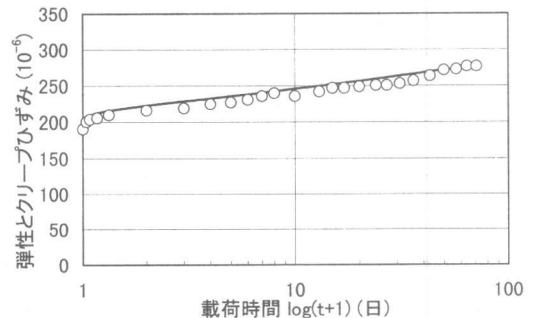


図-7 クリープ曲線と実験結果 (-100°C)

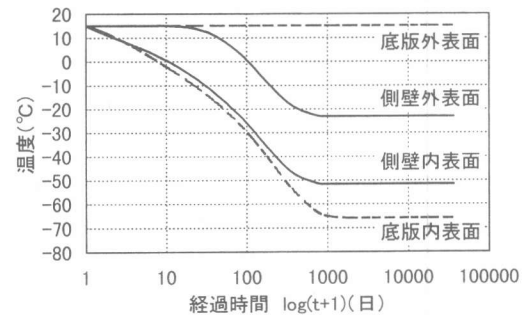


図-8 側壁中央部と底版中央部の温度経時変化

中央部と底版中央部での温度経時変化を示す。この図から、側壁及び底版は LNG によって徐々に冷却され、およそ 3 年で定常温度分布となることが明らかにされた。

図-9 に 30 年後の LNG 貯蔵地下タンクの温度分布を、図-10、図-11 には、30 年後の、側壁中央部の温度分布と底版中央部の温度分布を示す。側壁中央部は、内表面が -51.6°C 、外表面が -23.1°C で、内外面の温度差が 28.5°C であり、また底版中央部は、内表面が -65.9°C 、

外表面が 15℃で、内外面の温度差が 80.9℃になった。

4.2 クリープによる温度応力の緩和

側壁中央部及び底版中央部において、弾性解析とクリープ解析によって求めた、30 年後の応力分布を図-12～図-14 に示す。併せて、外荷重によって初期に発生する応力分布も示す。

温度勾配によって、内表面が引張、外表面が圧縮となるような温度応力が生じる。弾性解析の結果、30 年後に側壁中央部の内表面に生じる引張応力は、 θ 方向が 2.50N/mm^2 、 Z 方向が 4.83N/mm^2 であった。また、底版中央部の内表面に生じる引張応力は、 R 方向が 5.84N/mm^2 であった。

クリープ解析の結果から、30 年後に側壁中央部の内表面に生じる引張応力は、 θ 方向が 0.31N/mm^2 、 Z 方向が 2.55N/mm^2 であった。また、底版中央部の内表面に生じる引張応力は、 R 方向が 4.67N/mm^2 であった。図-5 に示したコンクリートの引張強度の温度依存性を考慮すると、いずれの引張応力も引張強度を下回っており、ひびわれは発生しないことが示された。

弾性解析との比較から、コンクリートのクリープによって、温度応力は顕著に減少し、側壁中央部の θ 方向応力は 59%、 Z 方向応力は 58%、また底版中央部の R 方向応力が 84% に低減することが明らかにされた。

側壁中央部の内表面と外表面の応力履歴を図-15 に示す。弾性応力解析では、定常温度分布に達したときに最大温度応力となり、それ以降は変化せず一定値のままである。クリープ解析では、定常時に温度応力は最大となるものの、それ以降もコンクリートのクリープによって徐々に温度応力は減少し続けることが明らかにされた。

5. まとめ

LNG 貯蔵地下タンクについて、温度応力のクリープ解析を実施した。この解析の特徴は、非定常熱伝導解析によって得られた温度分布、

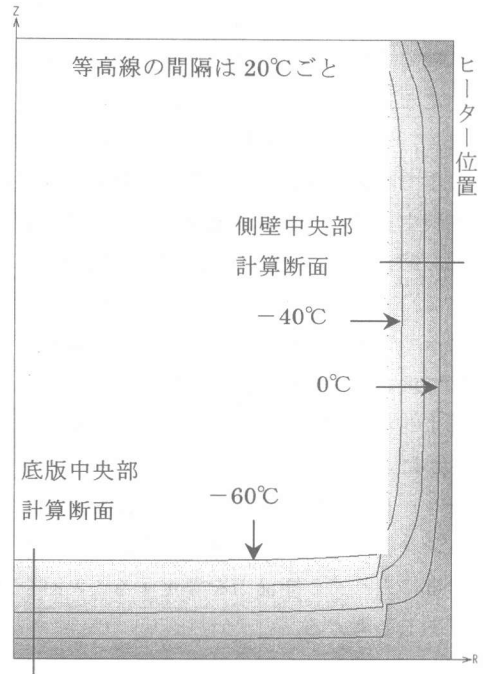


図-9 30 年後の温度分布

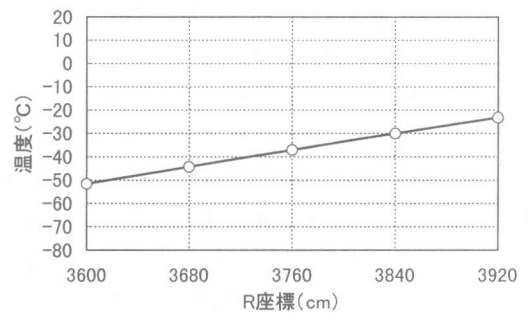


図-10 30 年後の側壁中央部の温度分布

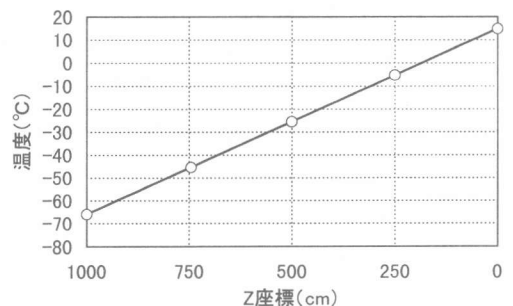


図-11 30 年後の底版中央部の温度分布

及び極低温下におけるコンクリートのクリープ試験で求めたクリープ曲線を温度応力解析に用いたことである。得られた結論を以下に示す。

(1) 非定常熱伝導解析から、LNG貯蔵後約3年で温度分布は定常に達し、側壁中央部及び底版中央部の内表面の温度は、それぞれ -51.6°C 、 -65.9°C と極低温になることが示された。

(2) 温度応力は、コンクリートのクリープによって顕著な緩和現象を示した。特に著しい側壁では、LNG貯蔵後30年において弾性解析による温度応力の約60%に減少することが明らかにされた。

(3) LNG貯蔵地下タンクの設計では、このコンクリートのクリープによる応力緩和現象を考慮に入れて、断面力を算定することが合理的であると考えられる。

参考文献

- 1) 後藤貞雄ほか：世界初の埋設式LNG地下タンクの開発と建設，コンクリート工学，Vol. 35, No. 2, pp. 18-25, 1997. 2
- 2) 大沼博志ほか：プレストレストコンクリート円環体の加熱実験による高温クリープ挙動の検討，電力中央研究所技術第二研究所報告，No. 74016, 1975. 7
- 3) 斉藤二郎ほか：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，Vol. 14, No. 8, pp. 9-17, 1976. 8
- 4) 岡田武二ほか：低温下におけるコンクリート部材の曲げ特性，コンクリート工学，Vol. 15, No. 11, pp. 9-20, 1977. 11
- 5) 大沼博志ほか：低温下におけるコンクリートのクリープ特性に関する研究，セメントコンクリート論文集，No52, pp. 650-655, 1998

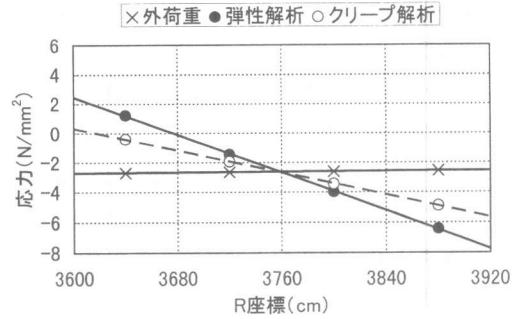


図-12 30年後の側壁中央部での θ 方向応力

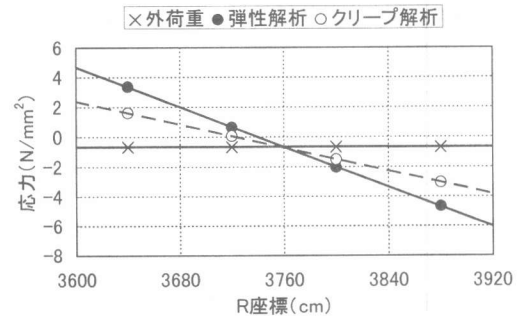


図-13 30年後の側壁中央部でのZ方向応力

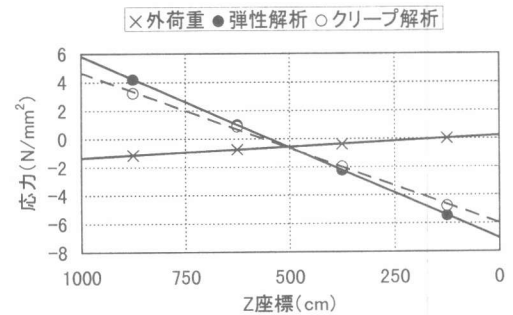


図-14 30年後の底版中央部でのR方向応力

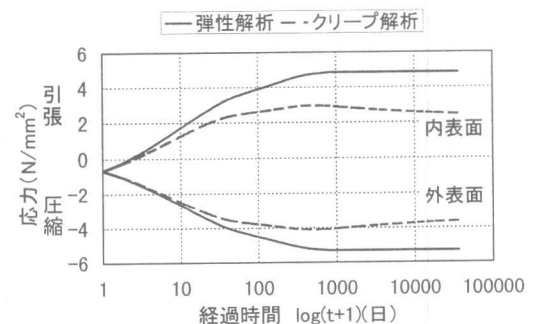


図-15 側壁中央部の内表面と外表面のZ方向応力履歴