

LNG 貯槽の構造特性に関する研究 (その4)

—LNG 地下式貯槽の非線形温度応力解析—

野村 敏雄 大内 一
武田 寿一

Study on Structural Behaviors of LNG Storage Tanks (Part 4)

—Nonlinear Thermal Stress Analysis of Underground LNG Storage Tanks—

Toshio Nomura Hajime Ohuchi
Toshikazu Takeda

Abstract

In Part 2, creep-crack analytical results of underground LNG storage tanks were shown in case of transient thermal load in normal operation. This report now gives the results of analyses considering variations in temperature-dependent physical properties and real loads that were disregarded in Part 2. As a result of analyses, if physical properties under low temperature are disregarded, bending moment due to thermal stress in a general part becomes 50%~60% in comparison with that under an elastic condition. However, when these physical properties are considered the bending moment becomes 80% because cracking of concrete is controlled by stress relaxation caused by creep and increase of strength due to lowering of the temperature. But, stress of reinforcing bar is only 200~300 kg/cm², and so including compression stress of concrete, stress is a low level.

In conclusion, the design method using a nonlinear response analytic computer program developed for this type of structure in this series of studies is touched upon.

概要

(その2)では LNG 地下式貯槽を対象とし、通常運転時非定常温度荷重に対するクリープ、クラック解析結果を報告した。そこで本報告は(その2)で考慮しなかった物性の温度依存性や長期実荷重の影響を考慮して解析を行なった。その結果、一般部の温度曲げモーメントについて考えてみると、低温物性を考慮しなければ弾性応力の50~60%となるのに対し、低温物性を考慮すると80%程度の値を与えた。これは低温物性を考慮した場合、引張領域のコンクリートについてクリープによる応力緩和と温度低下による強度増加などによりひびわれの発生が少なく押えられるためと考えられる。しかしながらその際の応力度は鉄筋の場合高々 200~300 kg/cm² 程度でありコンクリート圧縮応力度も含めて低応力レベルにとどまる。

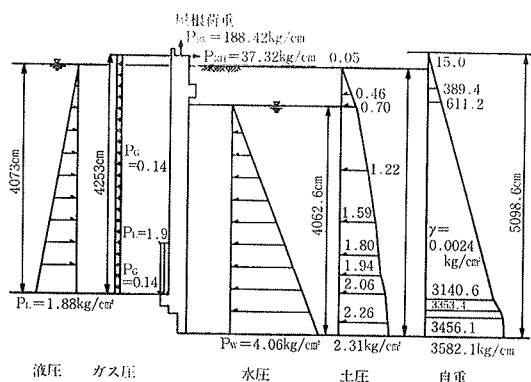
最後にこの一連の研究において開発した非線形解析プログラムによるこの種の構造物の設計法について言及した。

1. 序

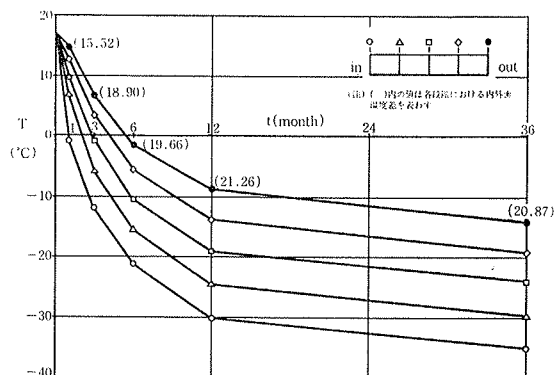
(その2)¹⁾で報告した軸対称 FEM 解析では、通常運転時を対象に、非定常温度荷重に対する LNG 地下式貯槽の挙動をクリープ、ひびわれなどを考慮した解析により求めた。その際、材料定数は常温時のそれを用いて解析した。しかしながら、LNG 貯槽の場合には側壁の内側で極低温にさらされることが予想される。特にコンク

リートの場合、常温時(0℃以上)の諸物性から低温時では大きく変化することが知られており、これらの物性の変化が及ぼす影響を把握するために解析を行なった。

すなわち、本報告では物性の温度依存性を考慮したクリープ、クラック解析により、当構造物の長期間にわたる挙動を長期実荷重の影響をも考慮して明らかにし、さらに温度応力を検討することとした。



図一1 長期実荷重



図二2 一般部における断面内温度の経時変化

2. LNG 地下式貯槽の温度応力解析

2.1. 荷重条件

作用荷重は通常運転時を想定することから、温度荷重及び長期実荷重(自重, 土圧, 水压, 液圧, ガス圧, 屋根荷重)を考慮する。解析上の取扱いとして長期実荷重は先行荷重として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。ただしクリープは温度荷重作用後の時間に対してともに考慮する。

また温度荷重は(その2)と同様に、凍結線を側壁の外側1.0mとした場合における熱伝導解析結果をもとに決定した。図一1~3に長期実荷重、一般部における断面内温度の経時変化、及び定常時における断面内温度分布を示す。

2.2. 材料定数

本解析では低温時に物性が大きく変化すると考えられるコンクリートに対してのみ物性(引張強度, 弾性係数)の温度依存性を考慮することとし(図一4)、鉄筋についてはこれを考慮しない。低温下におけるコンクリートの強度増加は種々の要因により変化するが、定性的には同様の傾向が認められており、今回は文献2)によることとした。常温時物性及びその他の物性は(その2)と同様である。またクリープ関数は低温時のものを用いる。

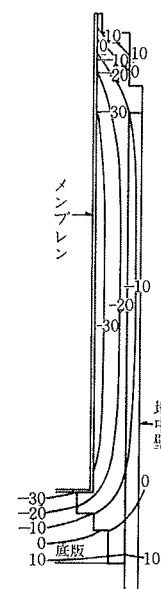
2.3. 解析モデル

LNG 地下式貯槽側壁を対象とし、要素分割などは(そ

の2)と同様であるが、本解析では連続地中壁根入れ部の効果を下端弾性バネに置換した。鉛直方向については杭基礎として計算した等価鉛直バネを、水平方向については地盤反力と側壁下端のリング効果を考慮した等価半径方向バネを設けることにした。

2.4. 解析結果

解析は次の様なケースについて行なった。(表一1) case 1は主に(その2)との比較の意味で側壁底部をローラ支承とした場合で作用荷重は温度荷重のみとし

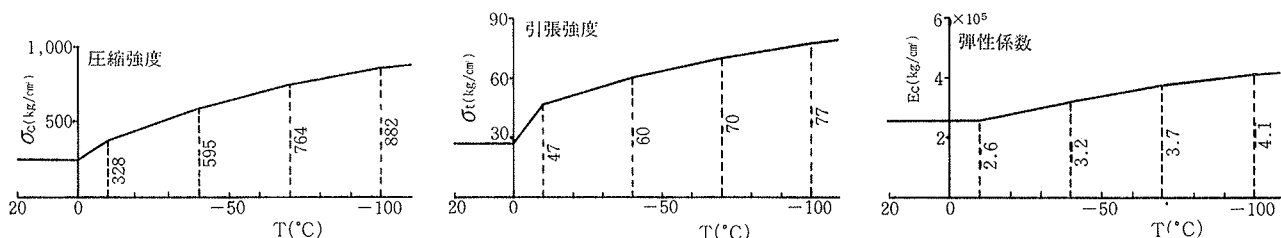


図一3 断面内温度分布(定常時)

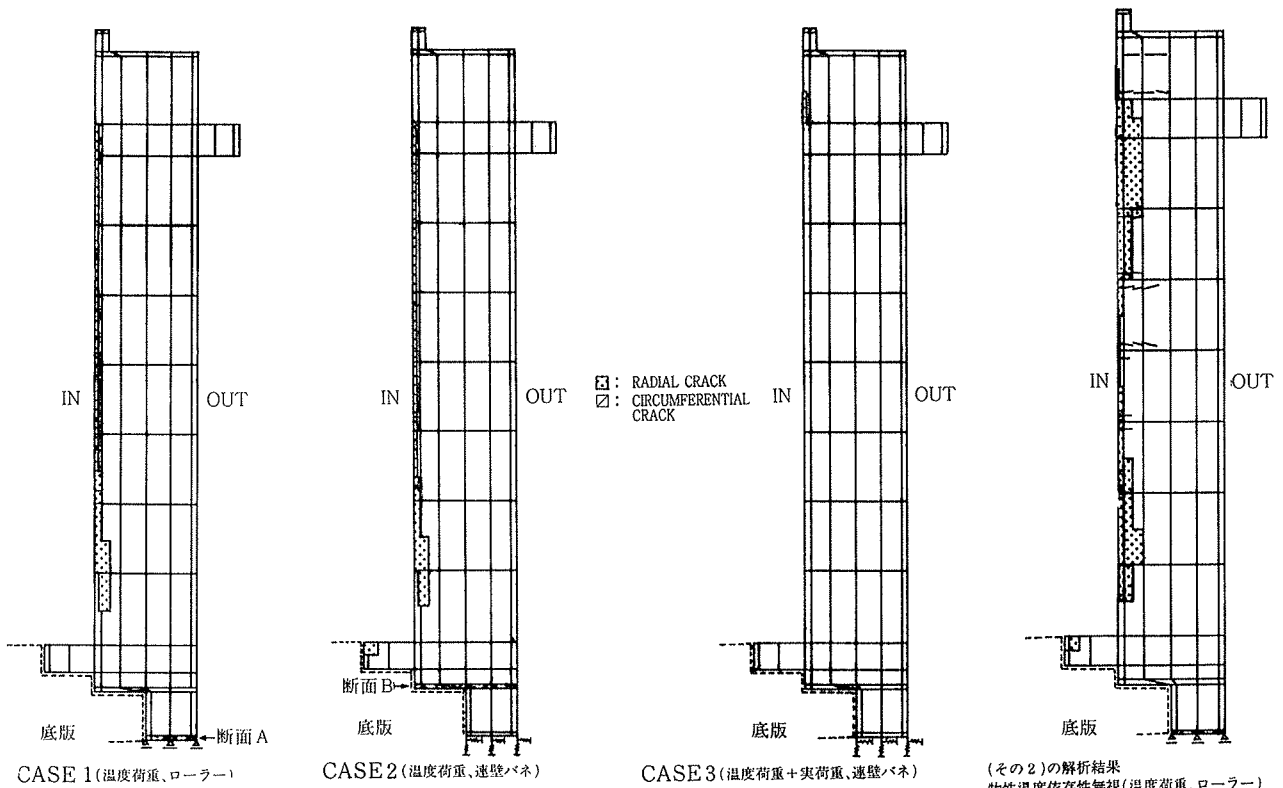
解析条件		解析ケース			
		1	2	3	4
荷重条件	実荷重			○	
	温度荷重	○	○	○	○
支持条件	ローラ	○			
	連壁バネ		○	○	○

備考: CASE 1~CASE 3: クラック+クリープ解析
物性温度依存性考慮
CASE 4: 弾性解析

表一1 解析ケース



図一4 材料定数の温度依存性



図一5 定常時ひびわれ分布

た。case 2, 3は地中壁の影響を考慮し、側壁底部に鉛直バネを導入した場合で、作用荷重はそれぞれ温度荷重のみ、温度荷重及び長期実荷重とする。これらによって長期実荷重の温度応力に対する影響、また case 1との比較にり支持条件の相違による温度応力に対する影響をみる。なお比較の基準となる弾性解析を case 4とする。

ひびわれ状況 図一5は定常時におけるひびわれ状況を示したものである。なお、定常とは温度荷重作用後36ヶ月における状態を言うものとする。

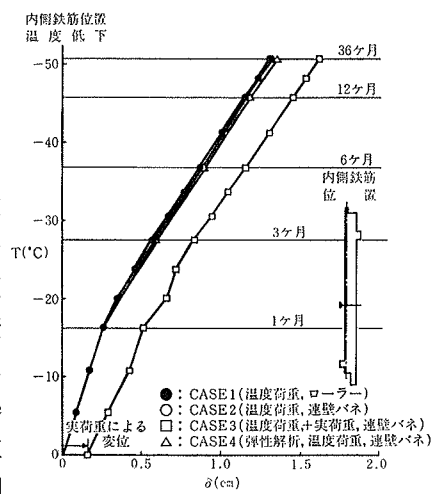
図から明らかなように物性の温度依存性を考慮しない(その2)の場合に比して case 1~case 2はひびわれの発生が Radial Crack, Circumferential Crack とともに減少する結果を与え、上部ほどその傾向は著しい。支持条件の異なる case 1と case 2において同様の傾向を示していることから、物性の変化を考慮するとひびわれ発生はかなり押えられると言える。case 1と case 2の間で異なる点は case 1では底部の断面A, case 2では断面Bにひびわれ(ともに Circumferential Crack)が発生することである。これは case 2の場合、図一3からわかるように断面Bの付近において上部と下部で温度分布が急変しており、上部と地中壁を含めた下部との熱収縮の割合が大きく違ってくることに起因するもので、鉛直バネによって底部の拘束モーメントは緩和されるものの、水

平バネによって熱収縮が拘束されるために断面Bにせん断ひびわれが発生すると考えられる。それに対して case 1の場合は鉛直方向のみを拘束していることから生じる拘束モーメントの影響が強く現われるものと言えよう。

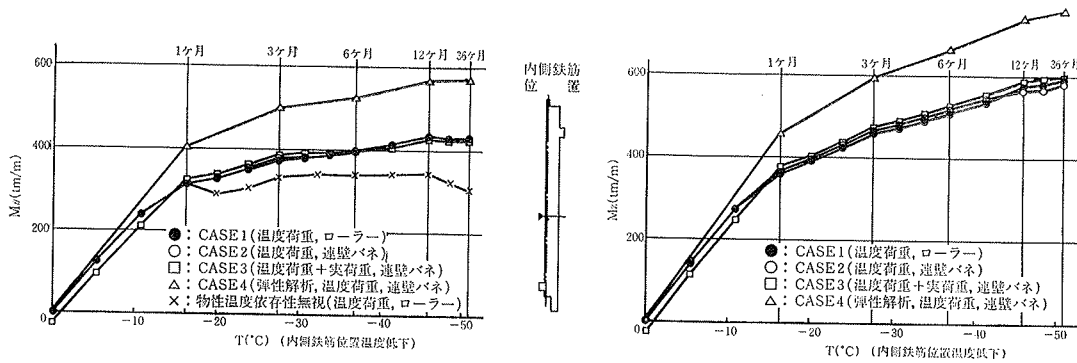
これらに対して case 3の場合には先行応力として長期実荷重による圧縮応力が作用しているためにひびわれはほとんど発生しない。

なおここで、Radial Crack とは円周方向引張力によって生じるもので縦ひびわれ、Circumferential Crack とは RZ 面内の応力 $\sigma_R, \sigma_Z, \tau_{RZ}$ によって規定されるもので水平ひびわれなどがこれに相当する。

温度変化—変位関係 図一6は一般部を対象に温度変化と半径方向変位の関係を示したものである。case 3の場合は実荷重による変位を当初考えることから、



図一6 温度変化—半径方向変位



図一七 温度変化—曲げモーメント

他の場合に比して若干大きくなるが各解析ケースとも同様の傾向を示している。case 1, 2は弾性解析と比較した場合、若干変形が小さくなっているが、これは変形がひびわれの生じていない部分の温度条件、すなわち弾性解析における全断面有効時における断面内の平均的な温度低下に比してひびわれ発生部を無視した断面内の平均的な温度低下の方が小さいことによる。

さらにおおよそ1ヶ月を過ぎた時点から勾配が変化するが、これは初期において断面内の温度状態が内面のみ急激な変化を有する非線形分布であり、断面全体の平均的な温度低下が小さいことによると考えられる。

温度変化—断面力関係 図一七は一般部における温度変化と断面中心回りの曲げモーメントの関係を示したものである。

円周方向では case 1, 2の場合には温度荷重作用後1ヶ月程度でひびわれが発生するので、クリープの影響も含めて曲げモーメント M_θ は緩和され定常時においてそれぞれ弾性解析の77%程度になる。それに対して case 3の場合にはひびわれは発生せず M_θ は定常時の80%程度になる。なお弾性解析においても勾配が変化するのは温

度分布形状の変化によるものである。

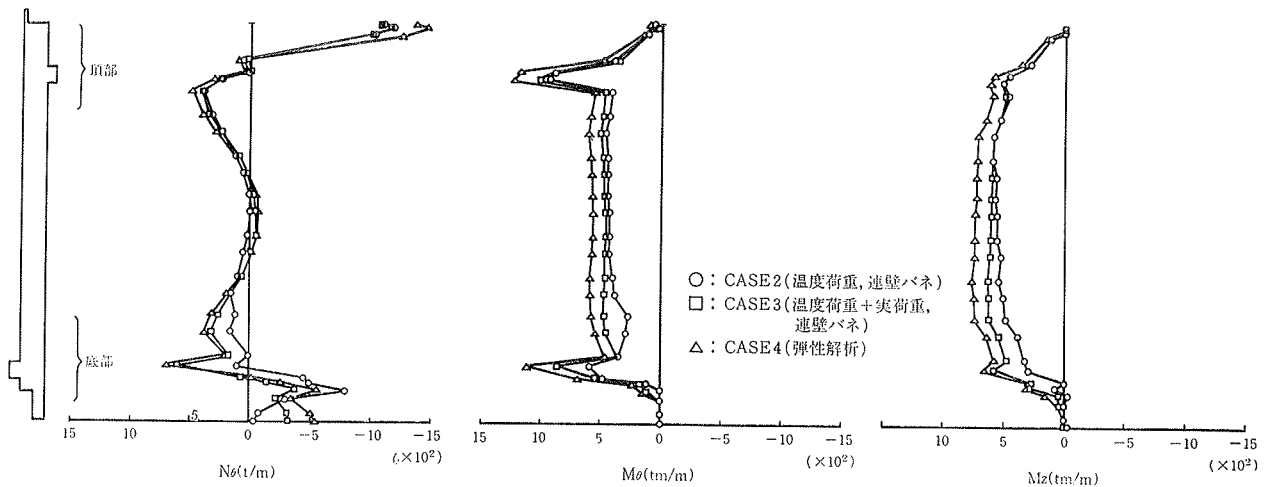
これらの値は(その2)の場合における約54%という値に比して低減がかなり小さいものと言える。これは物性の温度依存性を考慮することにより、一方で弾性係数の増加が考えられるものの、引張強度の増加の影響が強く現われひびわれ発生が押えられるためと考えられる。

なお定常時において M_θ は case 1では438 tm/m, case 2では439 tm/m, case 3では460 tm/m, case 4では576 tm/mとなっている。

鉛直方向も円周方向と同様に case 2ではひびわれとクリープ, case 3ではクリープの影響により曲げモーメント M_z は緩和され、それぞれ定常時に弾性解析の77%, 83%程度になる。またその値は case 2では624 tm/m, case 3では628 tm/m, case 4では751 tm/mである。

断面力分布 図一八は case 2~4の定常時における断面力分布を示したものである。ただし case 3の温度荷重+実荷重の場合には実荷重による断面力は再分配されないと仮定して、その分を差し引いて温度応力を評価したものである。

円周方向軸力 (N_θ) 分布をみると頂部及び底部は温



図一八 定常時断面力分布

度急変部にあたり、その上下部で拘束しあうために圧縮、引張の逆転現象がみられる。またこれらの影響を受けない中間部では軸力はほとんど発生しない。

鉛直方向軸力 (N_z) は温度急変部で多少乱れるものの断面全体を通してその値は小さい。

円周方向曲げモーメント (M_θ) 及び鉛直方向曲げモーメント (M_z) 分布をみると、 M_θ は断面急変部で大きくなるが、他の部分では一様な分布を示している。

弾性解析と case 2, 3 を比較した場合、それらはひびわれ及びクリープによって断面力は緩和されるが全体の分布形状は弾性解析の場合と同様の傾向を示す。ただし、case 2 の場合は前述のように底部付近にせん断ひびわれが生じるためにその断面力は大きく低減する。また case 3 は弾性解析と case 2 の中間に位置しているがこれは実荷重を考慮した場合には、全断面を通じて温度応力は低減していくことを示している。

3. あとがき

LNG 地下式貯槽の側壁を対象に、連続地中壁の影響や物性の温度依存性を考慮してクラック・クリープ解析した結果を以下に示す。

(1) 側壁底部に鉛直バネ、水平バネを設けて地中壁の影響を考慮した結果、ローラー支承の場合と比較して下部ではその影響が認められたが一般部にはその影響は波及しないものといえる。

(2) 物性の温度依存性を考慮しない場合には、内面付近の温度低下が $10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ (内外面温度差 $10^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 、約1ヶ月後の状態) でひびわれは発生し、3ヶ月程度で進展しなくなる。これは3ヶ月以後では温度勾配の増加が少ないことによる。それに対して温度依存性を考慮した場合には1ヶ月程度でひびわれは発生するが、弾性係数の増加による応力増加があるものの引張強度の増加の影響が大きく、それ以後ひびわれは進展しない。

(3) 軸力については、弾性解析と各解析ケースを比較した場合、一般部において大差はないといえる。

(4) 温度曲げモーメントを一般部を対象に評価すると、物性の温度依存性を考慮しない場合には常温物性を用いた弾性解析値の50~60%程度となり、結果的に従来の設計で用いられる値⁴⁾とほぼ等しい結果を与えた。これに対して本報告の様に物性の温度依存性を考慮した場合には、応力緩和は比較的少なく、定常時において実荷重を考慮しない場合は弾性解析値の75%程度、実荷重を考慮した場合は80~85%程度となる。これらの結果は物性の温度依存性を考慮しない場合と比較して主にひびわれが減少した為と考えられ、特に後者の場合にはひびわれは一般部において全く発生せず、クリープによる緩和のみ

に依存していると言える。

これまでの一連の研究(その1~その4)を通して、次の様に考える。

上記の結果は、構造解析により得られた断面力を基に鉄筋コンクリート梁理論より鉄筋量を定める現行の設計法を意識する時、むしろ厳しい結果を与える。しかしながら、著者らの論点はここにあるのではない。つまり、設計上例えば使用時の安全性を検討するのは、断面力ではなく、応力度であって、今回の様な解析法はコンクリートや鉄筋の時々刻々の変形挙動や応力を全て同時に与えることが出来、これらの値を直接応力度の検討に使用する設計法の可能性についてである。ちなみに、今回の解析では低温物性、実荷重を考慮した場合において、鉄筋応力度は高々 $200\sim 300\text{ kg/cm}^2$ であって、コンクリート圧縮応力度も含めて安全側の値を与えている。又、加えてこれらの非線形解析法は断面強度は勿論、構造物全体の強度をも決定出来、破壊に対する安全性を議論する上で重要な資料を与えるものといえよう。

弾性解析値を基に設計断面力を定める現行設計法では、温度応力の様な剛性依存型の応力を厳密に把握することは難しい。又、構造物の強度についても明確な安全性を決定づけることが困難である。これらの事柄は構造物の不静定次数が増大する程、そして荷重組合せが複雑になる程、面倒になってくる。

種々の不確定因子を考慮して画一化された安全率による検討を施さず現行許容応力度設計法は、それ自身バランスのとれた設計法であるということが出来る。しかしながら、計算機技術の一層の高度化が予想される今日、上記の様な非線形解析プログラムを用いて設計することが可能になってきている様に考えられる。構造物のより真実な挙動に着目して設計することは、合理であるといえよう。

そこで、一法として今回の様な一連の非線形解析プログラム(シェル構造解析、及び軸対称回転体構造解析)を用いたこの種の構造物の設計法を提案する次第である。以下に設計手順を示すが、前提条件として、貯槽内に蓄えられたLNG液体は運転期間中、空の状態になることはない、つまり槽内雰囲気温度は一定とする。

I. 一次設計

適当な剛性評価法によって算定された温度応力を含む組合せ設計応力(弾性応力)に対し、配筋計算を行なう。

II. 二次設計

上記の断面に対して、非線形解析を施し、得られた結果を基に断面変更を行なう。この際、例えば以下の様な荷重状態別の検討が必要とされる。

[通常運転時]: 考えられる諸荷重組合せに対して、軸

対称回転体構造解析を行ない、応答値に関して使用上の適切な安全性を得る。

〔中小地震時〕： 現行の震度法による設計荷重程度の地震力と長期荷重との組合せ状態が想定される。(その3)で述べた様なシェル構造解析⁶⁾を実施して、応答値に関して強度上及び使用上の適切な安全性を確保する。

〔大地震時〕： 破壊的な地震荷重に対して、同様にシェル構造解析を行ない、応答値に関して強度上の適切な安全性を確保する。なお、この場合特にメンブレン、保冷材などの内部機器の破損に対する配慮が必要となる。

以上の過程の中で、構造物各部の適切な安全性が得られないなら、断面修正して二次設計ループの中で再計算を行ない、合理的な断面に近づけていくことが必要となる。

最後に、これらの一連の研究を続ける上で、特に軸対称回転体非線形解析プログラム“TERESA”の開発に従事された故前山佳一氏に深謝し、安らかな永眠を祈る次

第である。

参考文献

- 1) 大内, 他: LNG 貯槽の構造特性に関する研究 (その2), 大林組技術研究所報, No. 25, (1982), pp. 7~12
- 2) 岡田, 他: 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, No. 146, (1977.11), pp. 9~20
- 3) 国島, 他: 低温下におけるコンクリートのクリープ特性について, 土木学会第31回年次学術講演会講演概要集, 第5部, (1976), pp. 16~17
- 4) 日本瓦斯協会: LNG 地下式貯槽指針, (1979.2)
- 5) 大内, 他: LNG 貯槽の構造特性に関する研究 (その1), 大林組技術研究所報, No. 25, (1982), pp. 1~6
- 6) 大内, 他: LNG貯槽の構造特性に関する研究, (その3), 大林組技術研究所報, No. 25, (1982), pp. 13~19