

# LNG 貯槽の構造特性に関する研究 (その3)

——温度及び地震時土圧荷重に対する GNL 地下式貯槽の終局挙動解析——

大 内 一 武 田 寿 一

## Study on Structural Behaviors of LNG Storage Tanks (Part 3)

——Analytical Study on Ultimate Behaviors of Underground LNG Storage Tanks  
Subjected to Both Thermal and Seismic Earth Pressure Loads——

Hajime Ohuchi Toshikazu Takeda

### Abstract

In Parts 1 and 2, axisymmetric analyses were carried out under conditions of normal operation of LNG storage tanks. However, it is necessary for safety and functioning of this type of structure to predict nonlinear behavior up to the ultimate state when considering seismic earth pressure which is the governing load for structural design. The failure behavior and the thermal stresses are ascertained by static finite element analyses of shell structures under uniform earth pressure on one side or both sides in addition to stationary axisymmetric loads including thermal load. The following are confirmed: (1) Concerning ultimate capacity, it reaches about three times the design load for seismic earth pressure and when considering the temperature dependence of material properties, the safety factor of three tends to be increased. (2) Thermal stresses can be reduced for practical design by the occurrence of cracks. (3) the circumferential thermal bending moment  $M_\theta$  on pressurized sides at the top of the tank thought to be greatly concerned with failure disappears.

### 概 要

(その1)、(その2)では通常運転時を対象とした軸対称解析を行なったが、設計上の支配的荷重である地震時増加土圧を考慮した時の終局に到る非線形挙動を明らかにしておくことは、当構造物の安全性、機能性を考える上で重要な事柄である。温度を含む定常軸対称作用荷重に加えて、一様矩形分布の両押し、および片押し土圧荷重に対する静的シェル FEM 解析を実施して、破壊性状、ひいては温度応力を明らかにした。その結果、(1) 地震時増加土圧に関する設計荷重に対し、終局耐力はほぼ3倍に達するが、物性の温度依存を考慮すれば、これはさらに増加する方向にあること、(2) 温度応力はひび割れなどにより低減するが、破壊に大きく関与していると思われる加圧面頂部の円周方向曲げモーメントについては消失することなどが分かった。

### 1. 序

LNG 地下貯槽は地下式という構造特性上、土水圧などの実荷重と、極低温貯蔵液体による温度荷重を常時受けているものと考えられる。この種の構造物は、さらに、地震荷重を含めた組合せ荷重に対して弾性設計のなされているのが現状といえよう。本研究は地震荷重として、とりわけ支配的であると考えられる増加土圧をとり上げ常時作用荷重も含めて静的 FEM 非線形解析を行なった結果の報告である。

ひび割れなどに代表されるコンクリートの非線形材料特性を考慮する時、(その1)で述べた様に、自己拘束型の応力である温度応力は実荷重の影響を受け、特に設計における支配的荷重である地震荷重との組合せを考えれば、その変動は大きいものと予測される。従って、特に温度応力などについては、固定して考えるのではなく、他の荷重との組合せを考慮し、構造物の挙動に対する適切な把握を行なって設計することが合理的である様に思われる。

地震荷重、特に破壊的なそれが明確になされていない

今日ではあるが、静的震度法に基づく地震時増加土圧<sup>1)</sup>を想定して、1) 両押し、及び2) 片押しの一様矩形分布荷重に対する非線形解析を実施し、終局挙動を明らかにすると共に、あわせて温度応力を検討した。

2. シェル構造 FEM 解析

本解析に当っては既に開発された4辺形折版有限要素法解析プログラム<sup>2)</sup>に、新たに温度応力解析機能を追加してこれを用いることにした。本法はコンクリートのひび割れ、圧縮塑性、鉄筋の降伏までを考慮した材料非線形解析である。温度応力解析に関する基本的取扱いを以下に示す。

2.1. 温度応力に対する基本的取扱い

一般に、構造材料は温度変化、収縮、結晶の成長などによって生じる初期歪を受ける。この様な歪を  $\epsilon_0$  で表わせば、実際の歪  $\epsilon$  と初期歪の差によって応力が発生することになり、従って応力-歪関係は

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon_0) \dots\dots\dots(1)$$

なる関係で表わされるが、増分形を考慮すると一般に  $d\sigma = D(d\epsilon - d\epsilon_0) + dD(\epsilon - \epsilon_0) \dots\dots\dots(2)$  となり、有限な増分形で表わすことにより次式を得る。

$$\Delta\sigma = D(\Delta\epsilon - \Delta\epsilon_0) + \Delta D(\epsilon - \epsilon_0) \dots\dots\dots(3)$$

今、(3)式で表わされる応力の発生している要素内で、静的に等価な節点力を仮想仕事の原理を用いて導く。要素内の歪は節点変位によって次の様に関係づけられる<sup>1)</sup>。

$$\Delta\epsilon = zB_b\Delta\delta_b + B_m\Delta\delta_m = (zB_b, B_m)\Delta\delta \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $B_b, B_m$  はそれぞれ、曲げ、面内変位に関する節点変位-歪マトリックスであり、 $z$  は板厚方向層状化された任意層中心から板中央面までの距離である。

節点に作用している実際の節点力を  $\Delta F$  とすると、仮想変位  $\delta^*$  を与えることにより発生する内部仕事量は(3)、(4)式を考慮しながら次の様に与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta U_{in} &= \int \epsilon^{*T} \Delta\sigma dV \\ &= \delta^{*T} K \Delta\delta - \delta^{*T} \int B^T [D \Delta\epsilon_0 - \Delta D(\epsilon - \epsilon_0)] dV \end{aligned} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $B = (zB_b, B_m)$

従って、外部仕事量  $\Delta U_{ex} = \delta^{*T} \Delta F$  と等置することにより次式が導かれる。

$$K \Delta\delta = \Delta F + \Delta F_1 + \Delta F_2 \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $\Delta F_1 = \int B^T D \Delta\epsilon_0 dV, \Delta F_2 = - \int B^T \Delta D(\epsilon - \epsilon_0) dV$  数値計算上(6)式は

$$K^1 \Delta\delta^1 = \Delta F^1 + \Delta F_1^1 + \Delta F_2^1 \dots\dots\dots(7)$$

但し、 $\Delta F_1 = \int B^T D^{i-1} \Delta\epsilon_0^i dV,$

$$\Delta F_2 = - \int B^T (D^i - D^{i-1}) (\epsilon^{i-1} - \epsilon_0^{i-1}) dV$$

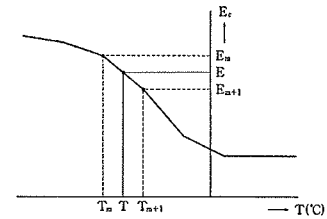
と表わされることになるが、ここに  $i$  は計算上のステップを表わす。式中  $(D^i - D^{i-1})$  は今回と前回の剛性差、又、 $(\epsilon^{i-1} - \epsilon_0^{i-1})$  は前回までの全応力歪をそれぞれ表わしている事に注意を要する。なお、これ等のことを実施するのは、物性の温度依存性を考慮することに寄因する。

次に初期歪  $\epsilon_0$  については次の様に温度で表わすことができる。

$$\Delta\epsilon_0 = \alpha(T) \Delta T \dots\dots\dots(8)$$

ここに  $\alpha$  は線膨張係数で、温度  $T$  の関数で与えられる。尚、初期歪  $\epsilon_0$  の板厚方向の分布については、直線分布に拘束されるものではない。

弾性係数についても、同様に multi-linear 近似して与えられた物性値一



図一 物性値 (E) - 温度関係

温度関係より、温度  $T$  で

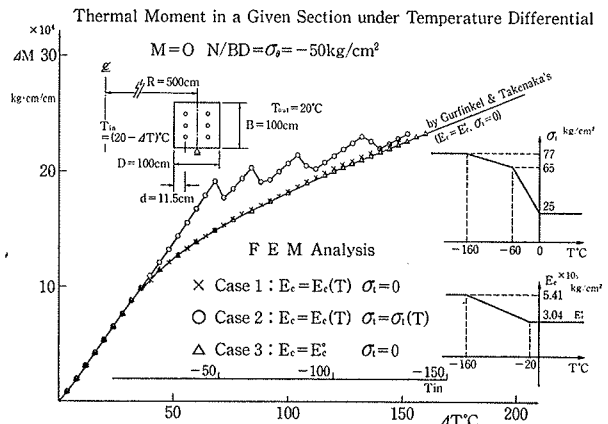
$$E = E_m + \frac{T - T_m}{T_{m+1} - T_m} (E_{m+1} - E_m) \dots\dots\dots(9)$$

(8)式中に現われる線膨張係数、及びポアソン比についても同様な処理が施され、これらは各要素各層毎に考慮して積分する事により(7)式が得られる。

なお、他にコンクリートについては、圧縮及び引張強度について温度依存性を考慮するものとする。又、鋼材については降伏強度、線膨張係数及び弾性係数についてこれを考慮する。

2.2. 温度応力計算例

解析法の妥当性、及び温度応力の基本特性を把握する目的で、内外面温度差を受ける平面リング\* (下面ローラ一支承、上面自由) を例題に採り上げた。これは、肉厚 100 cm, 肉厚中心半径 500 cm, 鉄筋比 0.38% (片側) ダブル配筋の RC リングに、当初圧縮軸力  $\sigma_\theta = 50 \text{ kg/cm}^2$  を与えて後、外表面温度を 20°C に保ったまま内面冷却を



図二 温度モーメント-内外面温度差関係

した時の挙動を観たものである。図-2には内外面温度差に対する温度モーメントを示すが、物性（コンクリート弾性係数  $E_c$  及び引張強度  $\sigma_t$  の温度依存性を検討する目的もあって、これらをパラメータに3例を示す。图中、実線は Gurfinkel 法<sup>3)</sup>による  $4M-4T$  関係を示すが、コンクリート弾性係数 ( $E_c$ ) 一定 (常温値)、同引張強度 ( $\sigma_t$ ) ゼロとした場合の FEM 計算例 ( $\Delta$ 印) はこれと良く対応している。一方、 $E_c$ ,  $\sigma_t$  共温度依存を考慮した場合の FEM 計算例 ( $O$ 印) は、 $\sigma_t$  の上昇により弾性限界荷重は高くなり、その後ひび割れの発生による断続的な変化領域を経て Case 3 及び Gurfinkel 値に漸近していくことを示す。これは  $E_c$  のみ温度依存を考慮した Case 1 ( $\times$ 印) に最終的 ( $4T=150^\circ\text{C}$ ) に漸近してくる訳であるが、これらと Case 3 (或いは Gurfinkel 値) との差は、極めて小さいと言える。このことは、コンクリートの引張を無視すれば弾性係数の温度依存は温度応力にほとんど影響を与えないことを示すものである。

次に温度分布性状の温度応力に与える影響を観る目的で、板厚方向温度分布を凸型、直線型、凹型とした場合の FEM 解析を上記と同モデルに対して実施した。図-3は  $4M-4T$  関係を示すが、凸型→直線型→凹型の順に温度モーメントは低くなる結果を与えており、このことは通常の非定常温度分布 (凹型より順次直線型へ) を考える時、直線型で代表される定常温度分布が、曲げモーメントに対し一番厳しくなることを示すものである。図-4には鉄筋応力を示すが、上記に反して直線分布の場合が一番大きくなっている。これは温度分布形状と鉄筋位置にもよると考えられるが、今回の様な断面については、直線分布は温度応力評価の上で安全側の値を与えるものと言える。

### 3. 地震時非線形挙動解析

図-5に示す LNG 地下式貯槽側壁を対象構造物とする。

#### 3.1. 構造体モデルの基本的取扱い

(1) 荷重: 常時作用荷重として、図-6に示す様に自重、土水圧、内液圧、屋根荷重を考慮し、温度荷重として熱伝導解析より得られた定常温度分布を与える

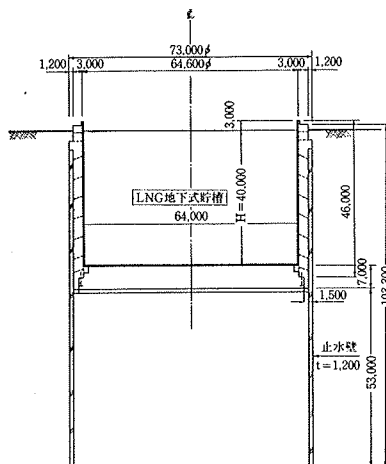


図-5 LNG 地下式貯槽

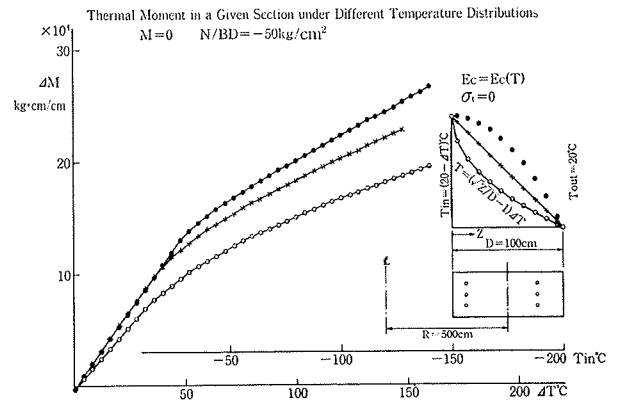


図-3 温度分布による曲げモーメントの相違

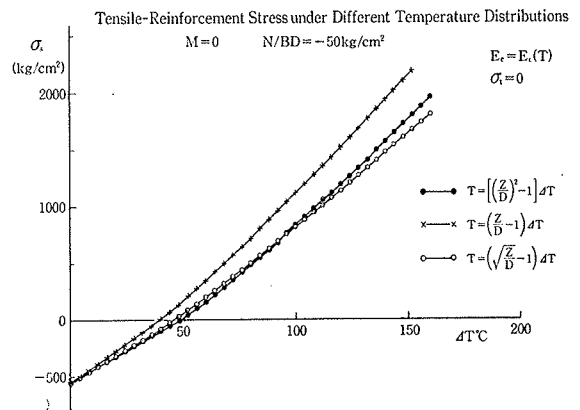


図-4 温度分布による鉄筋応力の相違

が、板厚方向は直線分布とする。次に地震時増加土圧については、種々の議論を呼ぶ処ではあるが、今これを図-7に示す様に一様矩形分布として、1) 両押しと、2) 片押しの場合について解析し、それぞれの挙動を観る。

(2) 構造形式: 地中壁は今回仮設用と考え、対象構造を側壁にしぼる (円周方向  $180^\circ$  分 12 等分割、鉛直方向 11 分割)。根入れ部の効果については、これを弾性床上の梁と考え、脚部の半径方向バネに置換する。

(3) 周辺地盤: 側壁の変形を拘束する媒体としての地

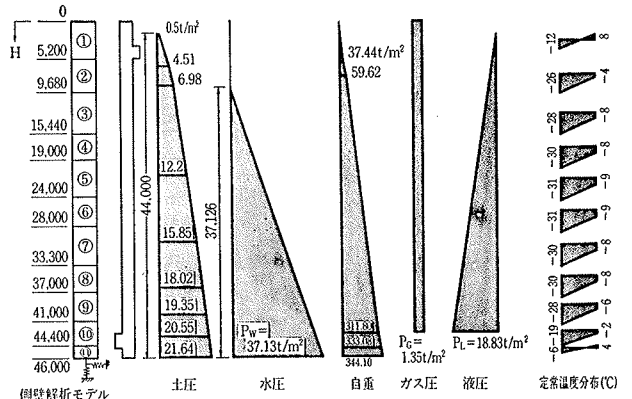


図-6 常時作用荷重

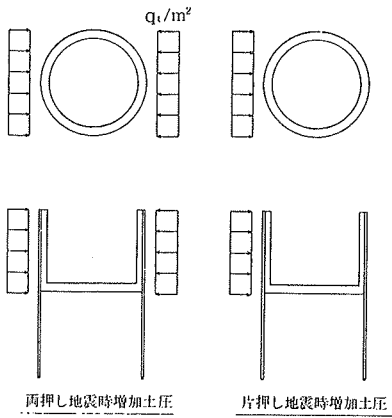


図-7 地震時土圧荷重

盤の影響は考慮しないこととする。

(4) 物性の温度依存性: コンクリート及び鉄筋物性値を文献4)に基づき、それぞれ図-8, 9の様

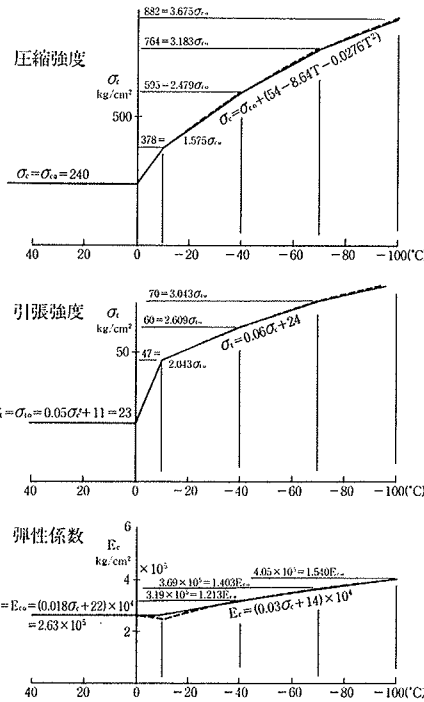


図-8 コンクリート諸物性の温度依存性

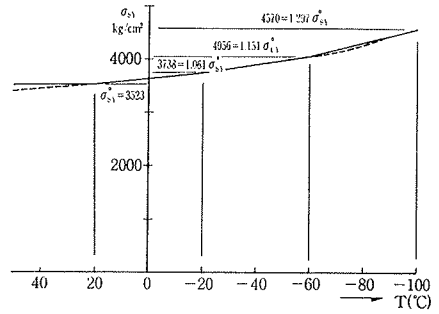


図-9 鉄筋降伏応力度の温度依存性

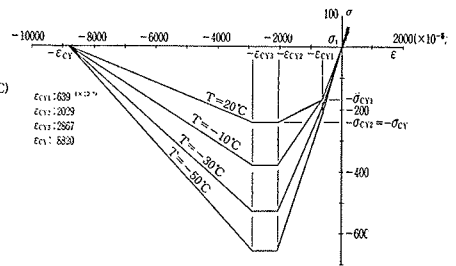


図-10 コンクリート1軸応力-歪関係(含低温)

に仮定する。コンクリートの1軸応力-歪関係はe関数法によって予測した常温時の関係を、軟化域を含むマルチリニアモデルで近似する。低温時については、各折れ曲り点での歪を固定し、図-8より求まる諸定数により、これらを決定する(図-10)。

なお、計算に当たっての荷重履歴は、まず土水圧などの常時作用実荷重を節点集中力として載荷し、次に定常温度荷重を与え、最後に地震時増加土圧を漸増的に載荷していくものとする。

3.2. 常時軸対称荷重に対する応力

図-11に温度を含む常時軸対称荷重組合せに対する側壁内コンクリートの発生応力を示す。図中でLは土水圧等の常時作用実荷重を、Tは温度荷重を、それぞれ表わす。側壁下方内面で、鉛直方向応力度  $\sigma_z$  が最大 45 kg/

cm<sup>2</sup> まで達しているが、低温による引張強度増加の為、ひび割れにまで至らず、本荷重状態に対しては弾性状態にとどまるものと言える。

3.3. 両押し土圧荷重に対する挙動

図-12に地震

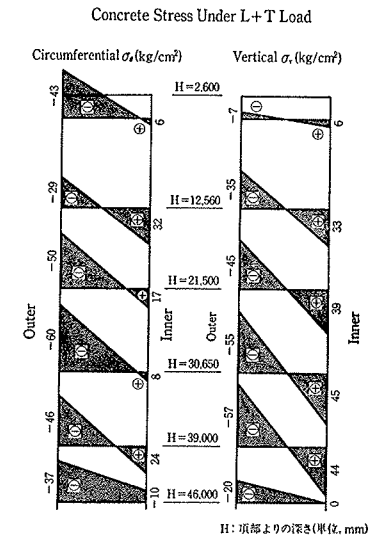


図-11 常時軸対称荷重応力

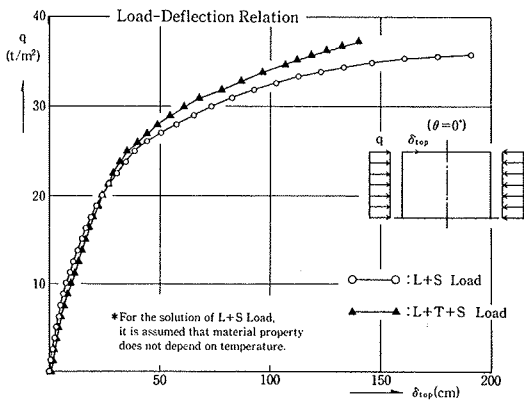


図-12 荷重-頂部水平変位 (両押し)

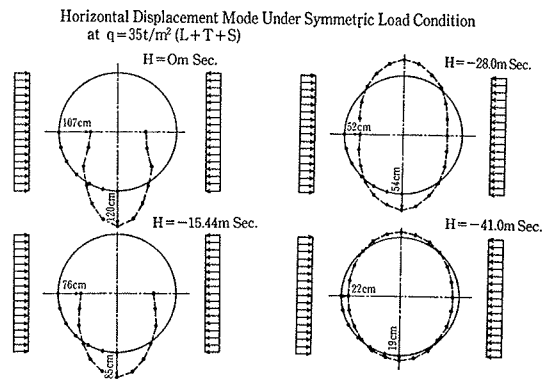


図-13 水平断面変位モード (両押し)

時土圧荷重と頂部加圧方向水平変位の関係を示す。ここに、L、Tは前節説明の通りであるが、Sは地震時増加土圧荷重を表わす。(L+S)と(L+T+S)の二つのケースを考えたのは、温度応力の影響を調べることにある。図中(L+T+S)の場合は、温度荷重という履歴を受けている以上、(L+S)の場合よりひび割れの発生は当初から顕著であり、若干低い勾配を示す。然し乍ら、終局時耐力はむしろ温度荷重の作用している方が高い値を示しており、温度による材料強度増加の影響がうかがえる(L+Sの場合は常温として解析)。なお、その値が小さい為明確には解らないが、図中  $q=0\text{ t/m}^2$  時の変形は、L又はL+T荷重時のそれを表わす。

図-13には各水平断面の変位モード図を示すが、頂部で曲げ変形の影響が大きく現われ、加圧面側の押し込みそして側面の膨らみが顕著に発生している。又、図-14には鉄筋の終局時降伏パターンを示すが、円周筋は加圧面側で内面側降伏、側部で外面側降伏と、押し込み膨らみに対応した円周方向曲げモーメント  $M_\theta$  の卓越が観察される(側面受働土圧パネは今回考慮していない)。又鉛直方向筋は  $\theta=0\sim 45^\circ$  側壁下部で、内外共引張降伏しており、 $\theta=90^\circ$ 線を対称軸とした浮き上りの影響を示して

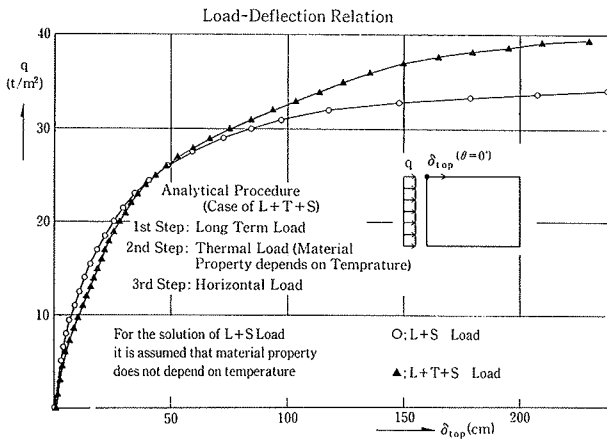


図-15 荷重一頂部水平変位 (片押し)

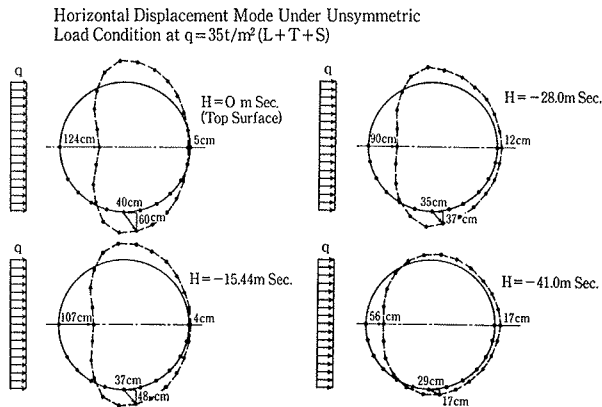


図-16 水平断面変位モード (片押し)

いる。

3.4. 片押し土圧荷重に対する挙動

図-15に荷重一頂部加圧方向水平変位を示すが、この場合も前節両押しの場合と同様(L+T)と、温度荷重履歴を含む(L+T+S)の二つのケースに

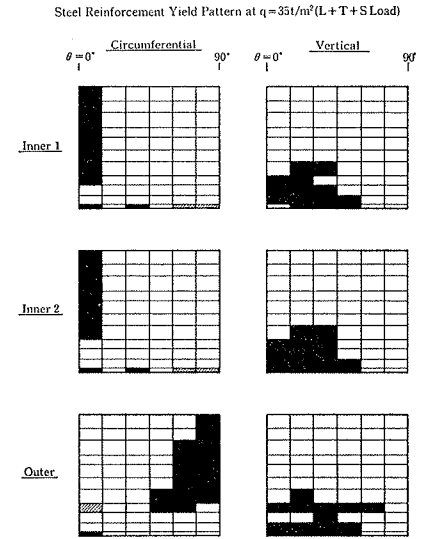


図-14 鉄筋降伏パターン (両押し)

ついて解析を行

なった。なお、L、T、Sの荷重種類については、前節と同様である。両押しの場合と同様に、温度荷重履歴を含む(L+T+S)については、ひび割れの発生が当初より顕著であるものの、終局耐力はむしろ(L+S)の場合より高くなっている。図-16には水平断面変位モードを示すが、これについても前節同様、加圧面側押し込み、側面膨らみと円周方向曲げ  $M_\theta$  の卓越が観察される。ただし、この場合は特に変形が加圧面側に集中し、その影響で側面が膨らむことから、加圧反対面では逆方向の変位が頂部で観察される。図-17には、終局時鉄筋の降伏パターンを示すが、円周筋については両押しの場合と同様に、加圧面内側筋、側面外側筋が降伏し、 $M_\theta$ の分布に対応しているものと言える。又、加圧面と反対側の頂部で内側筋が曲げ降伏、そして脚部  $90^\circ\sim 180^\circ$  付近で圧縮降伏が観察される。鉛直方向筋については、脚部  $0^\circ\sim 60^\circ$  位置で主として転倒モーメントに対する膜引張の卓越による降伏が観られ、 $90^\circ\sim 180^\circ$ 位置では外側筋だけが降伏する。後者

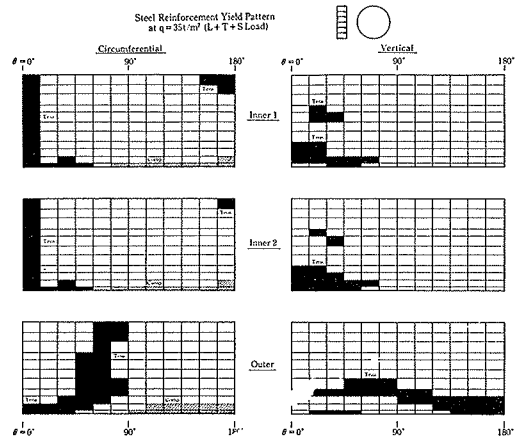


図-17 鉄筋降伏パターン (片押し)

については、円周筋同位置での圧縮降伏現象とあわせて、次の様な理由によるものと考えられる。片押しの場合には、両押しと異なり全水平力に対する反力は地中壁根入れ部効果を考慮した脚部バネに作用する事になる。図-18に半径方向バネ反力を示すが $\theta=90^\circ\sim 180^\circ$ 位置での値が特に大きくなっており、この力が同部分での円周方向圧縮膜力、及び鉛直方向曲げモーメントを卓越させているものと考えられる。

### 3.5. 温度応力

両押し、片押しの場合共加圧面側、特に頂部での円周方向曲げモーメントが卓越し、構造物の破壊性状に大きく関与しているものと思われる。

そこで、この部分での断面力  $M_\theta$ 、及び  $N_\theta$  に注目して、地震時増加土圧に対する変化を観ることとした。なお、両押し片押し共この部分での挙動は同様であるので、両押しの場合を代表させることにした。図-19は、温度荷重履歴を含む(L+T+S)の場合と、これを含まない(L+S)の場合を共に示すが、これらの差を温度応力として評価しようとするものである。曲げモーメントは、当初( $q=0\text{ t/m}^2$ )殆んど温度応力によるものと考えられるが、ひび割れの成長によりこれ等両者の差は次第に縮まり、終局ではほぼ重なるものと言える。このことは、温度応力がひび割れの成長、鉄筋の降伏にともない消失していくことを示す。膜力  $N_\theta$  についても同様に、途中での挙動に差が観られるものの、最終ではその差は殆んど無くなっている。これ等のことは、破壊メカニズムを想定して終局強度を考える時、温度応力の影響についてはこれを無視してよいことを示唆するものである。

### 4. あとがき

- 弾性状態——温度荷重を含む常時作用荷重下では、中央下部鉛直方向応力  $\sigma_z$  が  $45\text{ kg/cm}^2$  程度に達しているものの、低温によるコンクリート引張強度増加によりひび割れ発生まで至らない。
- 破壊性状——頂部加圧面での変形が、円周曲げ  $M_\theta$  に応じて卓越することが両押し、片押し載荷共観察され、これが構造体の破壊と大きく関わっているといえる。又全水平土圧に対する反力を地中壁で取らねばならない片押し載荷については、脚部 $90^\circ\sim 180^\circ$ 部分で、この反力による破壊が考えられる。地中壁根入れ部の効果を今回の

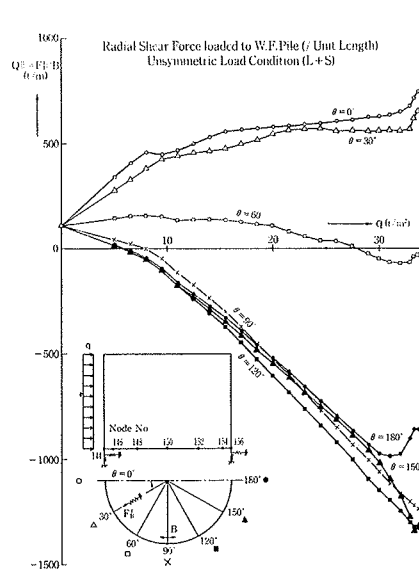


図-18 脚部半径方向バネ反力 (片押し)

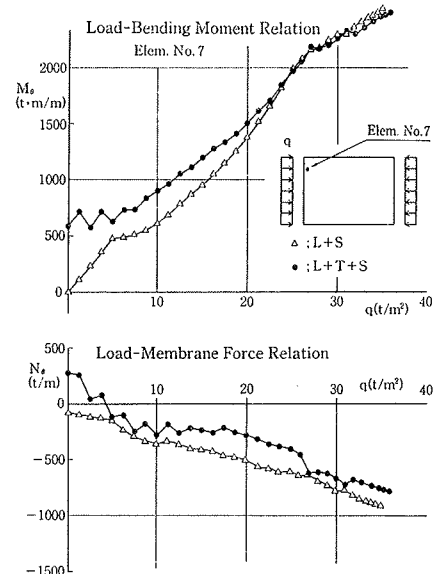
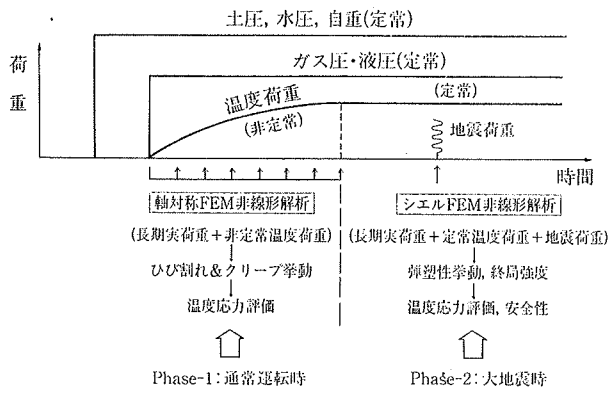


図-19 荷重-円筒方向断面力 (両押し)

解析では半径方向バネと鉛直方向バネに置換した。従って、脚部側面では膨らみに対する反力が卓越し、全水平力に対する反力は加圧面と反対面にある半径方向バネに集中したのと考えられる。

- 耐力——震度法に基づく地震時増加土圧に対して、終局耐力は設計荷重のほぼ3倍に達していること、又物性の温度変化を考えれば終局耐力はむしろ増加することが分かった。今回の解析は微小変形理論に基づく地下貯槽側壁のみの弾塑性解析である。従って、変形から決る他付属施設との取合いの問題や、座屈耐力などについては別途検討を要するものと思われる。
- 温度応力——弾性状態においては、組合せ応力に対し比較的大きな影響を有していた温度応力は、ひび割れの発生、鉄筋の降伏にともない次第に減少し、最終的には消失することが示された。なお、(その1)、(その2)で述べたクリープの影響については、今後検討していく必要がある。

温度応力に代表される自己拘束型の応力は、構造物の非線形域での挙動を考える時、荷重組合せに依存すると言える。特に設計上の支配荷重である地震荷重との組合せを考える時、温度応力の変動は大きいものと予測され従ってこれを固定して考えてしまうことは実状にそぐわない様に思われる。温度荷重を含む常時作用荷重は長期荷重として作用するものであり、この様な状態の中での地震入力に対して、構造物の挙動を如何に捉え、如何に設計するかは重要な課題である。そこで、図-20に示す様に Phase-1 と Phase-2 のアプローチで一連の研究を行なった。(その1)、(その2)での報告は Phase-1 に



図一20 LNG 地下貯槽解析研究アプローチ

対応するものであり、通常運転時を想定した荷重状態である。(その3)は Phase-2 に対応するもので、定常荷重

作用状態での大地震入力を想定したシェル構造解析である。今後、合理的な設計法に対する示唆が与える様、さらにこれら一連のスタディを加えていく所存である。

参考文献

- 1) 日本瓦斯協会: LNG 地下式貯槽指針 (原案), (昭和54.2)
- 2) 大内, 他: 大型冷却塔の弾塑性解析, 大林組技術研究所報, No.15, (1977), pp.1~9
- 3) G. Gurfinkel: Thermal Effects in Walls of Nuclear Containments Elastic and Inelastic Behavior, Ist SMIRT, J3/7, (1971), pp.277~297
- 4) 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, Vol. 15, No. 11, (1977) pp. 9~20