

LNG 地下貯蔵タンクの耐震設計について

中 川 恭 次
後 藤 洋 三
安 井 譲
三 浦 昭 爾
(土木本部技術部設計課)
田 中 徹 哉
(土木本部技術部設計課)
太 田 順
(機械計算部)

概 要

LNG地下貯蔵タンクの耐震設計にあたっては、地盤とタンクの動的な相互作用の問題をぬきにして考えることはできない。また、当社で開発されているタンクは、半径と深さがほぼ等しい薄い円筒形をなすコンクリートの外殻を有するため壁体の応力解析には、3次元解析を行なう必要がある。我々は、これらの問題を考慮しながら、波動理論を用いてタンクの壁体に作用する動的な地震時土圧を求め、ついで、静的な3次元有限要素法を用いてタンクの壁体の地震時応力を算定した。本報告は、LNG地下貯蔵タンクの耐震設計にあたって検討したこれらの工学的な方法およびその具体的なプロセスを示したものである。

1. まえがき

LNG 地下貯蔵タンクの耐震設計には広汎な問題が含まれているが、ここでは、タンクの鉄筋コンクリート壁体の地震時応力の問題を取扱った。

タンクを建設するにあたって、周辺地盤の動的な影響を考慮したタンクの地震時の挙動を明らかにし、その結果を設計面にとり入れることは重要なことである。

周辺地盤の動的な影響とりいれと、タンクの地震時の挙動を解明するための1つの方法として、地盤と構造物との相互作用の問題についての波動理論による解を利用する方法がある。しかし、地盤を単純な半無限弾性体と想定したとしても、このような根入れのある構造物についての波動理論解は、いまだに得られていない。

一方、この問題の解析手法として、有限要素法が考えられる。この方法は複雑な条件を考慮して相互作用の問題を解明する有効な解析手段の1つである。ところで LNG 地下貯蔵タンクのように円筒形の地下構造物と半無限的に拡がった周辺地盤との相互作用の問題については動的な3次元の有限要素法を用いる必要があるが、その厳密な解を得ることは現在のところ計算機の容量の点で一般的に困難である。

そこで、我々は LNG 地下貯蔵タンクの耐震設計にあたって、次のような考え方に添って検討を試みた。すなわち、剛体基礎に関する田治見氏の波動理論解¹⁾

を利用し、タンク中の液体の影響も考慮して、タンクの外壁に作用する動的な地震時土圧を検討する。そして、その最大地震応答土圧をタンクの構造体に作用する地震荷重として採用した。タンクのコンクリート壁の地震時応力は、「非対称荷重を受ける軸対称回転体の有限要素法による応力解法について」という当社開発のプログラム（以後、プログラム AXIS と呼ぶ）を用いて求めた。この計算結果と比較検討するために、タンクの構造体および周辺の地盤を含めて有限要素化したモデルを考え、各節点に震度法による水平荷重を設定し、プログラム AXIS を用いた静的計算によって、3次元の応力解析を行なった。

2. 解析手法

地震時のタンクの壁体の応力の計算および静的震度法に基づいた計算を行なう際に使用するプログラム AXIS の原理その他の概要については、大林組技術研究所報 No. 4 に詳しく述べられている²⁾ので説明は省く。

ここでは、動的な地震時土圧および液体の圧力の応答計算法について述べることにする。

田治見氏は、3次元の波動理論を用いて表層が軟弱で基礎を下層の剛基盤に支持された剛体のロッキング振動についての解を求めた。

一方、Housner は、容器が衝撃時に液体から受ける動的な圧力を計算するための工学的な方法を示した³⁾。

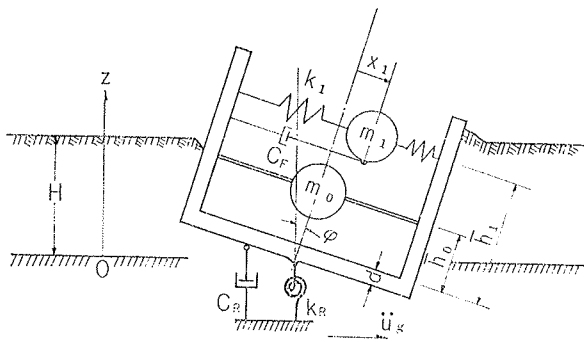


図-1 動的土圧を求めるためのモデル

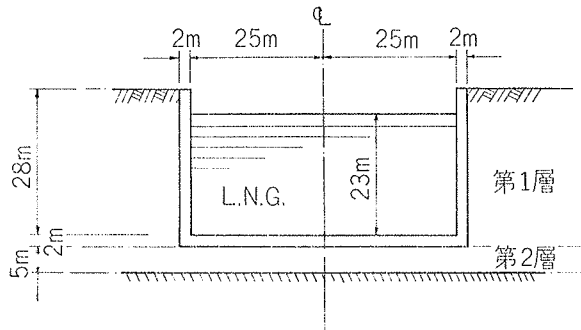


図-2 有限要素法のためのモデル

	γ t/m ³	ρ t/sec ² m ³	c_s m/sec	c_p m/sec	ν	E kg/cm ²	γ : 単位体積重量 ρ : 単位体積質量 c_s : S波の速度 c_p : P波の速度 ν : ポアソン比 E: ヤング率
地盤第1層	1.6	0.163	80	167	0.3	300	
地盤第2層	1.8	0.184	500	935	0.35	12,000	
コンクリート	2.4	0.245	-	-	0.167	240,000	
N.L.G.	0.49	0.05	-	-	-	-	

表-1

これらの結果を応用するために、LNG 地下貯蔵タンクを図-1 に示すようなモデルに置換した。すなわち、タンクは剛体で、その底面は剛な地盤に支持されており、底面の中心軸を回転中心としてロッキング振動を行なう。また軟弱な表層は単一の弾性層である。タンク内の液体については、Housner の方法を用いて2つの質点に置換する。その1つは、液体の慣性による影響を表わしたものであり、他の1つは、液体の1次振動による効果を置換したものである。

図-1 中の m_0 , m_1 , \bar{h}_0 , \bar{h}_1 , k_1 は Housner により次式で与えられている。

$$m_0 = m_F \cdot \frac{\tan h(\sqrt{3}R/H_F)}{\sqrt{3}R/H_F}$$

$$m_1 = (0.318m_F R/H_F) \cdot \tan h(1.84H_F/R)$$

$$\bar{h}_0 = \frac{H_F}{8} \cdot \left[\frac{4}{\tan h(\sqrt{3}R/H_F)/(\sqrt{3}R/H_F)} - 1 \right]$$

$$\bar{h}_1 = 1 - \frac{\cosh(1.84H_F/R) - 2.01}{(1.84H_F/R) \sin h(1.84H_F/R)}$$

$$\omega_1^2 = \frac{k_1}{m_1} = (1.84g/R) \tan h(1.84H_F/R)$$

$$h_0 = \bar{h}_0 + d, \quad h_1 = \bar{h}_1 + d$$

ここで、 m_0 : 液体の慣性効果を示す質量、 m_1 : 液

体の振動質量、 h_0 : m_0 のタンクの底面からの高さ、 h_1 : m_1 のタンクの底面からの高さ、 R : タンクの内径、 H_F : 液体の深さ、 d : タンクの底板の厚さ、 ρ_F : 液体の単位体積質量、 g : 重力加速度、 ω_1 : 液体の1次の固有円振動数

図-1 のモデルの運動方程式は次式で示される。

$$m_1(\ddot{x}_1 + h_1\ddot{\phi} + \ddot{u}_g) + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 = 0$$

$$(I_s + m_0h_0^2)\ddot{\phi} - h_1k_1x_1 - h_1c_1\dot{x}_1 + C_T\ddot{\phi} + k_1\phi = -(m_0h_0 + m_1h_1)\ddot{u}_g + M$$

上式中、 \ddot{u}_g は正弦波加速度 $\ddot{u}_g = -\omega^2 u_g e^{i\omega t}$ を示す。また M は表層の作用によるモーメントである。 M については田治見氏の解を用い、 $\phi = \varphi_0 e^{i\omega t}$, $x_1 = \bar{x}_1 e^{i\omega t}$ を上記の運動方程式に代入し、 φ_0 , \bar{x}_1 について解くとその解は次の様に得られる。

$$\varphi_0 = \psi(i\omega)\ddot{u}_g$$

$$\bar{x}_1 = \Phi(i\omega)\ddot{u}_g$$

$$\psi(i\omega) = \frac{1}{h_1} \left\{ -(\beta_s + \beta_b \frac{h_0}{h_1}) \frac{1}{\omega_s^2} - \alpha \frac{\pi}{2} \left(\frac{h_0}{H} \right) \frac{1}{\omega_s^2} G(i\omega) + \beta_s \frac{h_1}{h_1} \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right) \Phi_d(i\omega) \right\} /$$

$$\left\{ \left(\frac{\omega_s}{\omega} \right)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 F(i\omega) + \beta_s \omega_s^2 \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 \Phi_d(i\omega) + i 2 h_0 \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right) \right\}$$

$$\Phi(i\omega) = \Phi_d(i\omega) \{ 1 - \omega^2 h_1 \psi(i\omega) \} \cdot (-\omega_s \omega^2)$$

$$F(i\omega) = \frac{\sum_{n=1,3}^{\infty} \xi_n^2 \frac{\Omega_n}{n^2}}{\sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\Omega_n^2}{n^2}}, \quad G(i\omega) = \frac{\sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\Omega_n}{n^2} (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{\sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\Omega_n^2}{n^2}}$$

$$\Phi_d(i\omega) = \frac{-\frac{1}{\omega_s^2}}{\left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 + i 2 h_0 \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)}$$

$$\Omega_n = \frac{4K_1(\eta_{1n})K_1(\eta_{2n}) + \eta_{1n}K_1(\eta_{1n})K_0(\eta_{2n}) + \eta_{2n}K_1(\eta_{1n})K_0(\eta_{2n})}{\{K_1(\eta_{1n}) + \eta_{1n}K_0(\eta_{1n})\} \{K_1(\eta_{2n}) + \eta_{2n}K_0(\eta_{2n})\} - K_1(\eta_{1n})K_1(\eta_{2n})}$$

$$\eta_{1n} = \frac{\xi_n \omega_s a}{C_T}, \quad \eta_{2n} = \frac{\xi_n \omega_s a}{C_L}, \quad \omega_s = \frac{C_T \pi}{2H}$$

$$\xi_{ns} = \Omega_n |_{\omega=0}, \quad \xi_n^2 = n^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 + i 2 h_0 \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right) n^2, \quad i = \sqrt{-1}$$

$$\alpha = \frac{16(1-\nu_b)}{\pi^2} \cdot \frac{\mu}{\mu_b} \left(\frac{H}{a} \right)^2 \frac{a}{H} \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\Omega_{ns}}{n^2}, \quad \omega_s^2 = k_b / I_s$$

$$k_b = \frac{\pi}{2(1-\nu_b)} \mu_b a^3, \quad \beta_s = m_0 h_0^2 / I_s, \quad \beta_b = m_1 h_1^2 / I_s$$

$$\beta_s = m_2 h_0^2 / I_s, \quad h_0 = C_T / (2\sqrt{m_1 k_1}), \quad h_0 = C_T / (2\sqrt{I_s k_b})$$

$$\mu = \rho C_T^2, \quad \mu_b = \rho_b C_T^2$$

ここで、 a : 剛体の半径、 H : 表層の厚さ、 C_T : 表層のS波の速度、 C_L : 表層のP波の速度、 ν_b : 基盤のポアソン比、 ρ : 表層の単位体積質量、 ρ_b : 基盤の単位体積質量、 I_s : 剛体の底面中心線まわりの質量慣性モーメント、 m_s : 剛体の質量、 h_s : 剛体の重心の基盤からの高さ、 C_R : 剛体のロッキング振動に関する粘性減衰、 C_F : 液体の振動に関する粘性減衰、 h_g : 表層地盤の相当減衰定数、 K_0, K_1 : 変形されたベッセル関数

$\psi(i\omega)$, $\Phi(i\omega)$, はそれぞれ、基盤に正弦波加速度が入射した場合の、 φ_0 , \bar{x}_1 の複素周波数応答である。このとき、剛体の側面に作用する r 方向応力 σ_r および

水平面内せん断応力 $\tau_{r\theta}$ は下式のように求められる。

$$\sigma_r = S_\sigma(i\omega) \ddot{u}_g$$

$$\tau_{r\theta} = S_\tau(i\omega) \ddot{u}_g$$

これらの応力が剛体の底面の中心線まわりになすモーメント M は次式で与えられる。

$$M = M_S(i\omega) \ddot{u}_g$$

ここで、 $S_\sigma(i\omega)$ 、 $S_\tau(i\omega)$ 、 $M_S(i\omega)$ はそれぞれ σ_r 、 $\tau_{r\theta}$ 、 M の複素周波数応答であって、次式で表わされる。

$$S_\sigma(i\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \rho_n^2 \omega_n^2 K_1(\eta_{1n}) \cos \theta \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H}$$

$$S_\tau(i\omega) = -\sum_{n=1}^{\infty} B_n \rho_n^2 \omega_n^2 K_1(\eta_{1n}) \sin \theta \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H}$$

$$M_S(i\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \rho_n \pi a \left(\frac{2H}{n\pi}\right)^2 (-1)^{n-1} \omega_n^2 [A_n K_1(\eta_{1n}) + B_n K_1(\eta_{1n})]$$

$$\frac{A_n}{a} = -\frac{\{2K_1(\eta_{1n}) + \eta_{1n} K_0(\eta_{1n})\} \left\{ \frac{8\psi(i\omega)(-1)^{n-1}}{\pi^2 n^2} + \frac{4}{n\pi} \frac{1}{\xi_n^2 \omega_n^2} \right\}}{\{4K_1(\eta_{1n}) + K_1(\eta_{1n})\} \{K_1(\eta_{1n}) + \eta_{1n} K_0(\eta_{1n})\} - K_1(\eta_{1n}) K_1(\eta_{1n})}$$

$$\frac{B_n}{B_a} = \frac{2K_1(\eta_{1n}) + \eta_{1n} K_0(\eta_{1n})}{2K_1(\eta_{1n}) + \eta_{1n} K_0(\eta_{1n})}$$

また、液体によって、底面の中心軸まわりに生じる転倒モーメントおよび剛体の底面における基盤による抵抗モーメントの複素周波数応答は次式で表わされる。

$$M_{FV}(i\omega) = k_1 \phi(i\omega) h_1$$

$$M_{FI}(i\omega) = -\{m_0 h_0 - \omega^2 h_0^2 \psi(i\omega)\}$$

$$M_B(i\omega) = -k_R \psi(i\omega)$$

ここに、 $M_{FV}(i\omega)$ は、液体の振動によるもので、 $M_{FI}(i\omega)$ は、液体の慣性効果によるものである。

以上で、基盤に正弦波加速度が入射する場合についての解を得たわけであるが、複雑な地震動が入射する場合には、それがフーリエ級数で展開されているとき、上に求めた複素周波数応答を用いて地震応答を計算することができる。すなわち、入力地震波が

$$\ddot{y}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(\omega_k t + \varphi_k)$$

と表わされていれば、出力 X の地震応答は次式によ

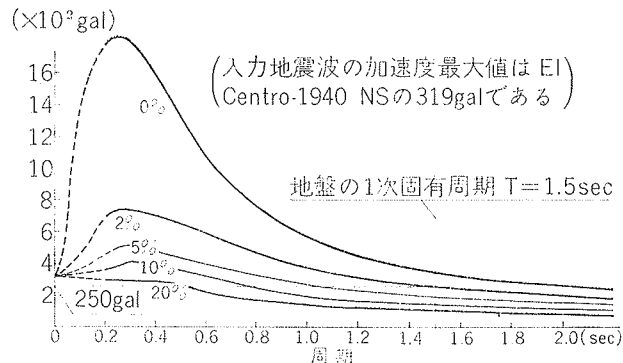


図-4 平均加速度応答スペクトル

て求められる。

$$X(t) = \sum_{k=1}^{\infty} S_k C_k \cos(\omega_k t + \varphi_k + q_k)$$

ここで、 S_k 、 q_k は X の複素周波数応答 $\bar{x}(i\omega)$ から、次のようにして求める。

$$S_k = |\bar{x}(i\omega)|, \quad q_k = \tan^{-1} \left[\frac{\mathbf{I}\{\bar{x}(i\omega)\}}{\mathbf{R}\{\bar{x}(i\omega)\}} \right]$$

$\mathbf{I}(x)$: x の虚数部分、 $\mathbf{R}(x)$: x の実数部分

これまで述べてきた手法を用いて、地震応答土圧を求め、その最大地震応答土圧を地震荷重としてタンクの壁体に作用させてプログラム AXIS を用いて、その地震時応力の 3 次元解析を行なう。

3. 地震時応力の計算

3.1. 計算準備

動的な地震応答土圧の計算には、図-1 に示したモデルを用いた。震度法の考え方にたった静的な比較計算のためのモデルとしては、タンクが図-2 に示した様な 2 層構成を持つ地盤に設置されたものと考えた。更に、プログラム AXIS に用いるためそのモデルを有限要素化したものを図-3 に示した。地盤の弾性波速度、土の単位体積質量、およびポアソン比は建設予定地の N 値および土質柱状図を参考にして常識的な値をとった。今回の計算に用いたこれらの地盤の諸定数およびコンクリート壁体その他の諸定数を表-1 に示

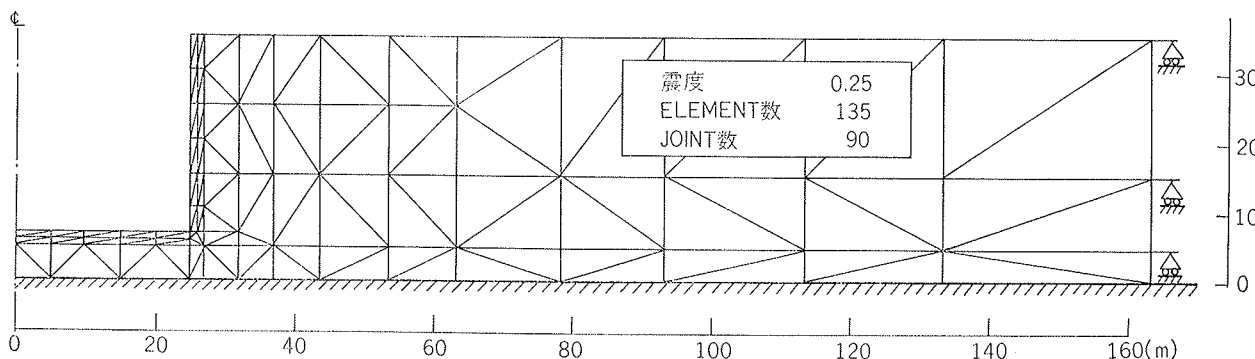


図-3 震度法による静的な計算のためのモデル

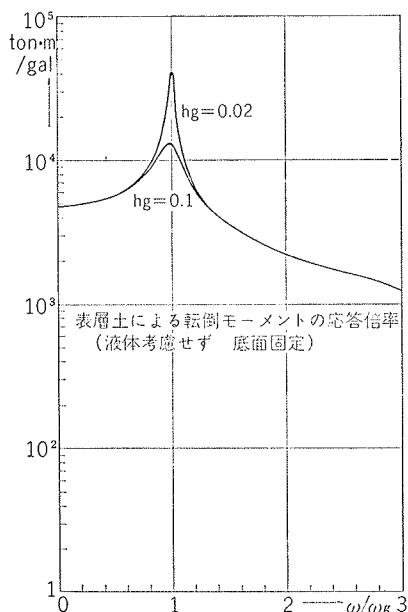


図-5

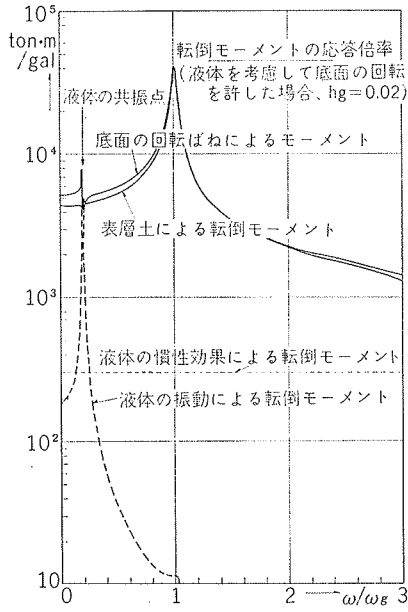


図-6

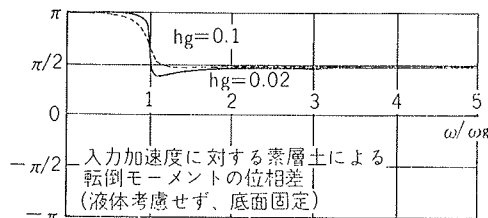


図-7

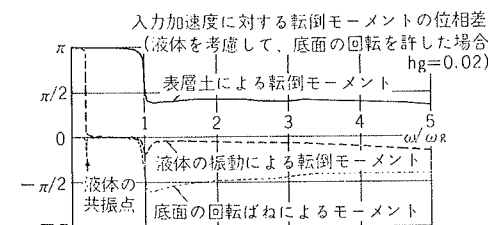


図-8

した。この場合表層の1次の固有周期は1.5秒である。

地盤の減衰定数 h_g は10%位が妥当であろうが今回は安全側にとって2%とした。また、タンクの底面のロッキング振動に関する減衰定数 h_R については0%、液体の振動に関する減衰定数 h_F については0.5%とした。

入力は、Elcentro 40 NS 319 gal をフーリエ級数に展開して、動的な地震応答の計算に用いた。静的計算で採用した震度については、図-4に示した平均加速度応答スペクトルを用いて、0.25とした。

3.2. 若干の基本的な性質について

タンクの外壁に作用させる動的な地震時土圧を計算するに先立って、タンクの動的な特性を概括的に把握するための数値計算を行なった。図-5～図-8に底面の中心軸まわりのモーメントの複素周波数応答の絶対値(応答倍率)と入力加速度に対する応答モーメントの位相差を示した。

これらの図から、地震時のタンクの挙動は表層土の1次の共振による影響が支配的であること、表層土が1次の共振時状態にあるとき表層土からタンクの外壁に作用するモーメントの特性はタンクの底面の拘束条件および液体の存在の有無等によって殆んど影響を受けないことが予想される。また、液体の1次の固有周期は7.65秒であり液体の共振現象については今回のLNG地下貯蔵タンクの耐震設計にあたっては、主要な問題になり得ないものと判断できる。

3.3. 動的な最大地震応答土圧の計算

3.2で行なわれた考察を確認するために、転倒モーメントの地震応答計算を行なった。その結果を図-9

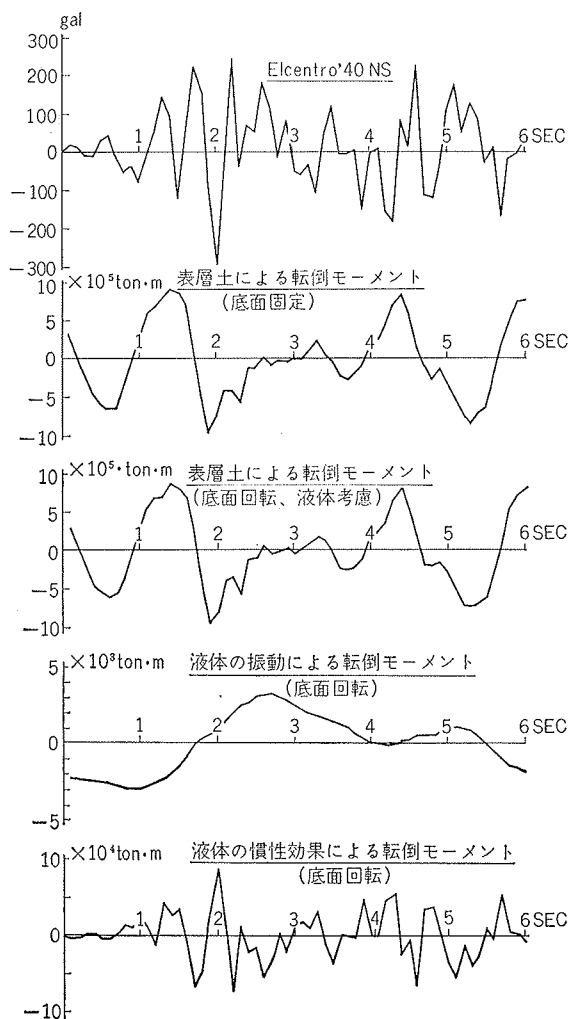


図-9

表層土が剛体の側面に作用する応力 σ_r の地震応答 (hg=0.02)

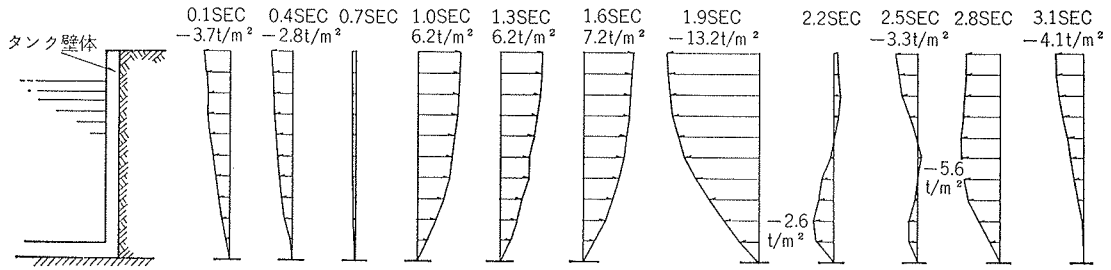


図-10

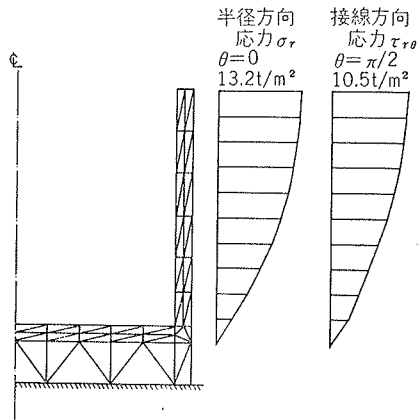


図-11 最大地震応答応力

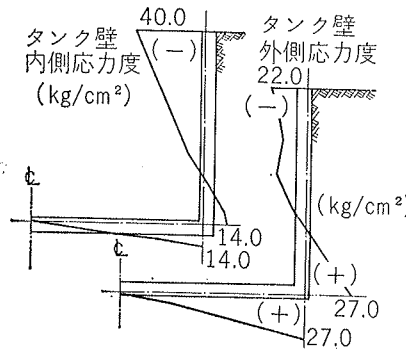


図-12 動的方法による σ_θ

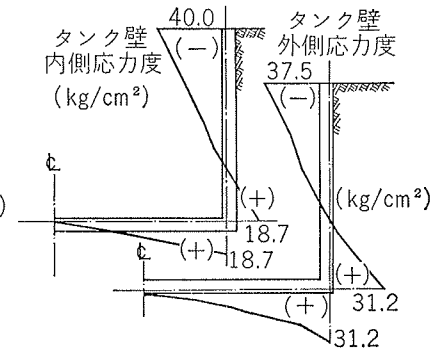


図-13 静的方法による σ_θ

に示す。液体を考慮した場合についてはタンク底面の回転を許した。図-9から底面の回転と液体の影響に関する3.2の考察が確認される。

この検討をふまえて地震応答土圧を求めるにあたって、今回は、タンクの底面の回転を拘束し、液体の影響を無視することとした。

図-10は、タンクの側面の $\theta=0$ の位置において表層土によって生ずる半径方向応力 σ_r の深さ方向の分布を時間経過に従って示したものである。接線方向応力 $\tau_{r\theta}$ についても同様に計算することができる。その結果得られた最大地震応答応力を図-11に示した。ここで $\tau_{r\theta}$ は $\theta=\pi/2$ の位置のものである。これらの σ_r と $\tau_{r\theta}$ とを下式によって合成して最大地震応答土圧 P とした。

$$P = \sigma_r \cos \theta - \tau_{r\theta} \sin \theta$$

3.4. タンクの壁体に生ずる地震時の応力計算

最大地震応答土圧をタンクの壁体に作用させ、プログラム AXIS を用いて3次元の応力解析を行なった。その結果得られた接線方向の直応力 σ_θ を図-12に示した。このとき、タンク上端の変位は2.3cmであった。図-3に示したモデルを用いて、静的な震度法(震度=0.25)の考え方に基づいて行なった解析結果を図-13に示した。このときのタンク上端の変位は2.1cmで

あった。これらの結果から、動的な最大地震応答土圧を地震荷重として採用する方法と静的な震度法による結果とはよく一致していることがわかる。

4. 結 語

LNG 地下貯蔵タンクの耐震設計にあたって、液体を考慮し、表層地盤がタンクの側面に作用する動的な地震時の土圧を波動理論を用いて計算した。その最大地震応答土圧をタンクの壁面に作用させ、静的な3次元の有限要素法を用いて壁体の応力の解析を行なった。比較のため、タンクとその周辺地盤を有限要素化したモデルについて、震度法により水平荷重を設定し、3次元の応力解析を行なった。その結果、2つの解析結果は良く一致した。従って、最大地震応答土圧を地震荷重として用いることができタンク壁のみを有限要素化して、より詳細な3次元の応力解析が可能となる。

参考文献

- (1) 田治見：深い基礎を有する構造物の地震応答について 日本地震工学シンポジウム (1966)
- (2) 伊藤：有限要素法による構造物の応力解法について 大林組技術研究所報 No. 4
- (3) G. W. Housner: Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Container S. S. A. Vol. 47, (1957)