

二重殻円筒タンクの地震時動水圧に関する観測と解析

EARTHQUAKE OBSERVATION AND NUMERICAL ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON ANNULAR AND CYLINDRICAL TANK

忌部正博*

By Masahiro IMBE

The earthquake observation was carried out on an actual tank, which is annular and cylindrical, made of a prestressed concrete and is on a pile foundation. The accelerations, hydrodynamic pressures and strains of reinforcing bars were recorded for 16 earthquakes. The observed data were processed using A-D conversion and spectrum analysis. The observed results were checked by the numerical analysis which is based on two kinds of method, one is an analytical solution by potential theory and another is a finite element method using a coupled fluid-structure model. It was concluded that the stresses of the side wall were induced mainly by the dynamic water pressure acting on the side wall and that the dynamic water pressure was magnified due to the coupled fluid-structure motion.

1. ま え が き

円筒タンク内の液体の地震時動水圧については、従来より種々の研究が行われており、耐震設計に必要な液面動揺量およびタンク側壁に働く動水圧の算定方法も具体的に提案されている。一般に広く知られている手法としては、ハウズナー理論¹⁾と速度ポテンシャル理論^{2)~4)}が挙げられ、比較的容易に液面動揺量および動水圧の算定が可能である。一方でこれらの理論がタンクを剛体と仮定していることを問題として、タンク側壁の可撓性が無視できない場合に関して模型振動実験⁵⁾、有限要素法による解析⁶⁾を試みる例もみられ、タンクと内容液の連成振動による影響にも注意が向けられている。しかし、実物タンクでの地震観測結果の報告が皆無に等しい現状から、側壁が比較的剛と考えられるコンクリート製タンクの設計に際しては、ハウズナー理論もしくは速度ポテンシャル理論を用いることが多いように思われる。

一方、二重殻円筒タンクの外側水槽に貯えられた円環状の液体の地震時挙動については、研究の数も少ないが、近年原子炉格納容器の耐震設計などでその必要性が生じており、模型実験・数値解析等が試み始められている。

著者は、先に円環状の液体の動水圧について、一重殻の円筒タンクと同様の手法を適用して、速度ポテンシャルによる理論解を導き、模型振動実験の結果との比較検討を行った⁷⁾。しかし、その後二重殻構造のプレストレストコンクリート製実タンクの地震観測を行う機会があり、動水圧を中心に検討を行ったところ、タンクと内容液の連成振動の影響が無視できないことが明らかになった。

本論文は、地震観測結果に基づいて実タンクの振動性状を検討するとともに、速度ポテンシャル理論および有限要素法による連成振動解析の計算結果と観測データとの比較を行い、タンクと内容液の連成効果について検討を加えるものである。

2. 解析手法

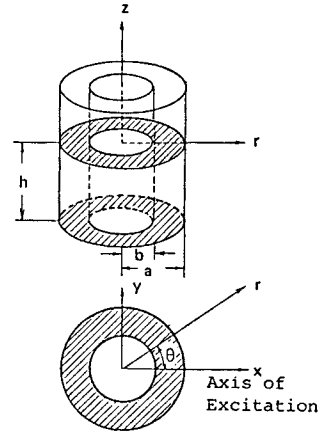
(1) 速度ポテンシャルによる理論解

円環状の液体の動水圧は、円筒状の液体に適用される速度ポテンシャル理論に内槽の境界条件を追加することで多少複雑な式になるものの円筒の場合とよく似た理論式で与えられる。基礎式の誘導については文献2), 7), 8)などに詳しいのでここでは省略するとして、一重殻と二重殻の両者の結果はよく似ているので、比較の意味でおのおのの解を表-1, 表-2に示す。表-1はランダム波

* 正会員 工修 三井建設(株)技術研究所
(〒270-01 流山市駒木 518-1)

表一 ランダム波入力に対する非定常解

液面変位 $\eta(r, \theta, 0, t)$	$-\frac{1}{g}(\ddot{r}u_z - a \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i \Psi_i(r, h) \dot{v}_i(t)) \cos \theta$ 円筒一重殻 $-\frac{1}{g}(\ddot{r}u_z - a \sum_{i=1}^{\infty} A_i C(e_i \frac{r}{a}) \dot{v}_i(t)) \cos \theta$ 円筒二重殻
動水圧 $p(r, \theta, z, t)$	$-\rho(\ddot{r}u_z - a \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i \Psi_i(r, z) \dot{v}_i(t)) \cos \theta$ 円筒一重殻 $-\rho(\ddot{r}u_z - a \sum_{i=1}^{\infty} A_i C(e_i \frac{r}{a}) \frac{\cosh e_i(\frac{z+h}{a})}{\cosh(e_i \frac{h}{a})} \dot{v}_i(t)) \cos \theta$ 円筒二重殻
但し、	$\beta_i = \frac{2}{(e_i^2 - 1) J_1(e_i) \cosh(e_i \frac{h}{a})}$ $\Psi(r, z) = J_1(e_i \frac{r}{a}) \cosh(e_i \frac{z}{a})$ e_i は $J_1'(e) = 0$ の i 番目の正根 円筒一重殻 $A_i = \frac{2}{\pi} \frac{(\frac{2}{\pi e_i} - \kappa C(\kappa e_i))}{(e_i^2 - 1) + C^2(\kappa e_i) (1 - \kappa^2 e_i^2)}$ $C(e_i \frac{r}{a}) = J_1(e_i \frac{r}{a}) Y_1(e_i) - J_1(e_i) Y_1(e_i \frac{r}{a})$ e_i は $J_1'(e) Y_1'(\kappa e) - J_1'(\kappa e) Y_1'(e) = 0$ の i 番目の正根 円筒二重殻 $\kappa = b/a$
	$\ddot{v}_i(t) + 2h_i \omega_i \dot{v}_i(t) + \omega_i^2 v(t) = \ddot{u}_i(t) + 2h_i \omega_i \dot{u}_i(t)$ ω_i : i 次固有円振動数 $\omega_i^2 = \frac{g}{a} e_i \tanh(e_i \frac{h}{a})$ h_i : 粘性減衰比 ($= \frac{2h_i}{\omega_i}$) $\dot{v}_i(t)$: 応答加速度 $\dot{u}_i(t)$: 入力加速度 $J_1(x)$: 第1種1階ベッセル関数 $Y_1(x)$: 第2種1階ベッセル関数 $J_1'(x) = dJ_1(x)/dx$ $Y_1'(x) = dY_1(x)/dx$ g : 重力加速度 ρ : 液体密度



図一 円筒座標系

表一の正弦波入力に対する定常解で短周期加振の場合として $\lambda_i = \omega_0/\omega_i \gg 1$ とすると $e_i \rightarrow 1$, $\phi_i \rightarrow \pi$ となり、一般に耐震設計で用いられる衝撃圧分布を得ることができる。

(2) 有限要素法によるシェル-液体連成振動解析

容器と内容液をおのおの別個に有限要素法により定式化し、境界上での力のつり合いを利用して両者を結合する。

薄肉軸対称シェル⁹⁾および回転体流体要素¹⁰⁾の定式化については一般的なものでここでは省略する。なお、流体は圧縮性完全流体と仮定し、微小振幅理論が適用できるものとしている。

最終的にシェルおよび内容液の離散化された振動方程式がおのおの式(1), (2)で与えられる。

$$[M_s] \{\ddot{u}_s\} + [K_s] \{u_s\} = \{F\} \text{..... (1)}$$

$$[M_f] \{p\} + [K_f] \{p\} = \{I\} \text{..... (2)}$$

ここに、

- $[M_s]$: シェルの質量マトリックス
- $[K_s]$: シェルの剛性マトリックス
- $\{u_s\}$: シェル各節点の変位ベクトル
- $\{F\}$: シェルに働く外力ベクトル
- $[M_f]$: 流体の質量マトリックス
- $[K_f]$: 流体の剛性マトリックス
- $\{p\}$: 流体各節点の圧力ベクトル
- $\{I\}$: 流体に働く外力ベクトル

$$\ddot{u}_s = \frac{d^2}{dt^2} u_s, \quad \dot{p} = \frac{d}{dt} p$$

内容液が容器との境界面に鉛直に与える動水圧は微小運動を仮定すると式(3)で与えられる。

$$F_{ir} = s_i(p_i - \rho g u_{iz}) \text{..... (3)}$$

ここに、

F_{ir} : シェル節点 i に働く力と法線方向成分

表二 正弦波入力に対する定常解

液面変位 $\eta(r, \theta, 0, t)$	$\frac{A}{g} (r \sin \omega_0 t + a \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i \Psi_i(r, h) e_i \sin(\omega_0 t - \psi_i)) \cos \theta$ 円筒一重殻 $\frac{A}{g} (r \sin \omega_0 t + a \sum_{i=1}^{\infty} A_i C(e_i \frac{r}{a}) e_i \sin(\omega_0 t - \psi_i)) \cos \theta$ 円筒二重殻
動水圧 $p(r, \theta, z, t)$	$\rho A (r \sin \omega_0 t + a \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i \Psi_i(r, z) e_i \sin(\omega_0 t - \psi_i)) \cos \theta$ 円筒一重殻 $\rho A (r \sin \omega_0 t + a \sum_{i=1}^{\infty} A_i C(e_i \frac{r}{a}) \frac{\cosh e_i(\frac{z+h}{a})}{\cosh(e_i \frac{h}{a})} e_i \sin(\omega_0 t - \psi_i)) \cos \theta$ 円筒二重殻
但し、	A : 入力正弦波加速度振幅 $e_i = \frac{\pm \lambda_i^2 \sqrt{1 + (2 \frac{h_i}{\lambda_i})^2}}{\sqrt{(1 - \lambda_i^2)^2 + (2 h_i \lambda_i)^2}}$ $\psi_i = \tan^{-1} \frac{2 h_i}{\lambda_i (1 - \lambda_i^2) \{1 + (2 \frac{h_i}{\lambda_i})^2\}}$ $\lambda_i = \frac{\omega_0}{\omega_i}$ e_i は ψ_i が正の時 正、負の時 負をとる。 ω_i : i 次固有円振動数 ω_0 : 入力正弦波の円振動数

入力に対する非定常解を、また表二は正弦波入力に対する定常解を示す。なお、二重殻の座標系は図一に示すが、一重殻については、文献2)から引用したため、座標系の $x-y$ 平面を図一と異なり容器底面を取っている。

- s_i : 境界面の分担面積
- p_i : 流体節点 i に生ずる平均圧力
- ρ : 流体密度
- g : 重力加速度
- $u_{i,z}$: シェル節点 i の鉛直方向変位

一方、容器により内容液に働く力は式 (4) で与えられる。

$$I_i = -s_i \ddot{u}_{ir} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、

- I_i : 流体節点 i に働く圧力
- s_i : 境界面の分担面積
- \ddot{u}_{ir} : シェル節点 i の法線方向加速度

式 (3), (4) を用いて、シェルと液体の連成振動方程式を作成すると、外殻については式 (5), 内殻については式 (6) を得る。ここに、外殻と内殻では容器と流体の間の力のやりとりが互いに逆向きになっている。

$$\begin{bmatrix} M_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_z & 0 \\ A^T & 0 & 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_r \\ \ddot{u}_\theta \\ \ddot{u}_z \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} + K_g & -A \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & 0 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_z \\ p \end{Bmatrix} = -\ddot{e} \begin{bmatrix} M_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_z & 0 \\ A^T & 0 & 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

$$\begin{bmatrix} M_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_z & 0 \\ -A^T & 0 & 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_r \\ \ddot{u}_\theta \\ \ddot{u}_z \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} - K_g & A \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & 0 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_z \\ p \end{Bmatrix} = -\ddot{e} \begin{bmatrix} M_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_z & 0 \\ -A^T & 0 & 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、

- $\begin{bmatrix} M_r & 0 & 0 \\ 0 & M_\theta & 0 \\ 0 & 0 & M_z \end{bmatrix}$: シェルの質量マトリックス
- $\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}$: シェルの剛性マトリックス*

u_r, u_θ, u_z : シェルの各変位成分 (相対変位)

- $[M_f]$: 流体の質量マトリックス
- $[K_f]$: 流体の剛性マトリックス**
- p : 流体の圧力
- $[K_g]$: $s_i \rho g$ より成るマトリックス
- $[A]$: s_i より成るマトリックス
- $[A]^T$: $[A]$ の転置マトリックス

- s_i : 境界節点 i の分担面積
- ρ : 流体密度
- g : 重力加速度
- \ddot{e} : 地動加速度

* 回転の自由度を消去するようにマトリックスの縮小を行っている。

** 自由表面およびシェルとの境界節点の自由度のみを残すようにマトリックスの縮小を行っている。

3. 地震観測

(1) 観測概要

地震観測地点は埼玉県北葛飾郡庄和町で、江戸川東部の千葉県から西部の埼玉県の一部に広がる野田台地上にある。地盤性状は、図-2に示すように、表層は厚さ約7.5 mの軟弱な関東ロームの埋土で、その下部に砂質土と粘性土が互層状に堆積し、GL-43 m以深からはN値50以上の締った砂層となっている。

観測を行ったプレストレストコンクリート製タンクの一般構造図を図-3に示す。本タンクは貯水用で、災害時の緊急用に使用するために二重円筒式になっており、外径は58 m、有効水深は15.9 mである。内槽の水位は給水の有無により水深15 m付近を変動するが、外槽は緊急用水確保のため、常に満水状態になっている。側壁支承部は、側壁と底版の境目に積層パットが充填されて

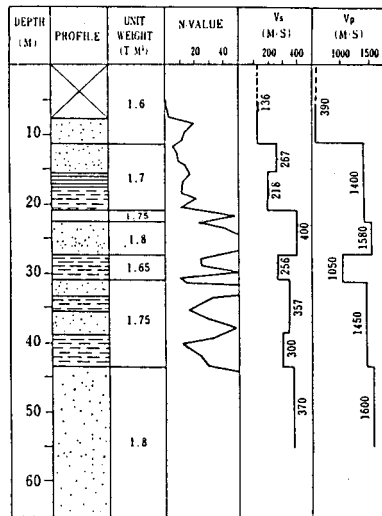


図-2 地盤柱状図

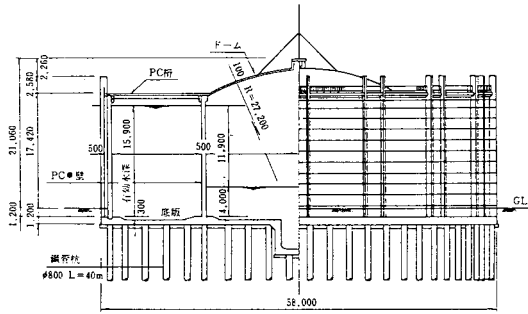


図-3 PCタンク一般構造図

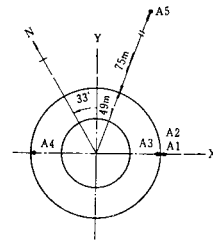
おり、回転に対してやや可動性をもたせている。また、基礎構造は、鋼管杭でGL-43 m以深の砂層を支持地盤としている。

地震観測は、圧電型加速度計を図-4に示すように、基礎杭の支持地盤である砂層中 (GL-59 m) と地表面 (GL±0 m) およびタンク底版部と側壁頂部に計5か所 (12成分) 設置して行った。また、同時に図-5に示すように外槽の外殻側壁にひずみ型鉄筋計 (10か所)・水圧計 (3か所) を取り付け側壁応力と動水圧の計測も行った。

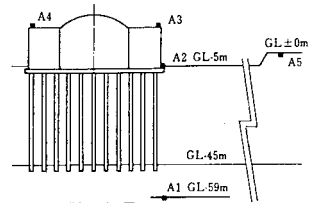
(2) 観測記録

1981年6月~1982年2月の間に32回の地震記録が得られたが、そのうち地表面加速度が5 gal以上の16回の記録 (図-6, 表-3) を波形解析の対象とした。これらのうち半数の8回が震央距離50 km以下の近距離地震, 3回が100 km未満の中距離地震, 5回が100 km以上の遠距離地震であった。

最大応答加速度は、地表面では地震No.3のX方向で87.7 gal, タンク底版では地震No.16のX方向で, 48.3 galであった。また、比較的規模の大きい地震No.6 (マグニチュード7.0) では継続時間が3分以上にも及んだ。



平面図



断面図

図-4 加速度配置図

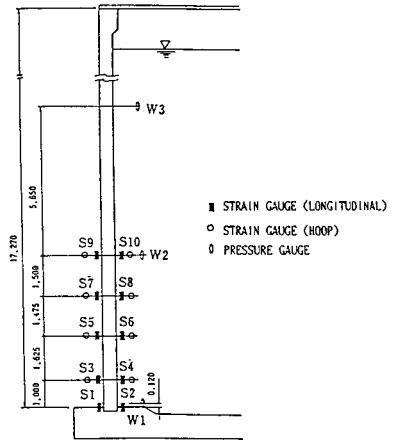


図-5 鉄筋計・水圧計配置図

表-3 観測地震一覧

No.	DATE	震源	マグニチュード M	震央距離 (km)	震源深さ (km)	観測最大加速度 (gal)				気象庁震度階
						GL-59m	GL±0m	底版	側壁頂部	
1	'81.9.14	茨城県南西部	4.8	37	70	6.5	21.0	5.9	9.3	Ⅳ宇都宮, Ⅱ東京・熊谷
2	'81.11.3	"	4.4	13	50	6.9	23.8	9.3	13.7	Ⅲ宇都宮, Ⅱ東京・熊谷
3	'82.3.7	鹿島灘	6.5	85	60	25.0	87.7	30.1	40.2	Ⅳ水戸, Ⅲ千葉・熊谷, Ⅱ東京
4	'82.3.19	千葉県中部	4.8	50	70	1.4	8.1	2.2	4.1	Ⅱ東京, Ⅲ千葉・宇都宮
5	'82.4.19	茨城県南西部	4.7	15	50	10.4	45.6	15.7	26.2	Ⅲ水戸・宇都宮, Ⅱ東京・熊谷
6	'82.7.23	茨城県沖	7.0	190	30	11.8	40.1	20.0	27.9	Ⅳ福島・銚子, Ⅲ東京・熊谷
7	'82.8.12	伊豆大島近海	5.7	120	30	1.7	7.2	4.0	4.5	Ⅳ東京, Ⅲ横浜, Ⅱ熊谷・千葉
8	'82.8.14	茨城県沖	5.4	135	40	1.6	5.6	2.7	3.3	Ⅲ水戸, Ⅱ東京・宇都宮
9	'82.8.24	"	5.8	150	30	1.7	13.9	3.2	13.7	Ⅲ宇都宮, Ⅱ銚子・熊谷
10	'82.9.6	鳥島南方沖	7.0	720	180	1.6	6.9	3.0	3.6	Ⅲ新潟・福島, Ⅱ東京・熊谷
11	'82.10.25	千葉県北部	4.2	60	40	2.4	15.0	3.2	6.0	Ⅲ東京, Ⅰ千葉・宇都宮
12	'82.11.10	茨城県沿岸	5.1	95	100	2.0	10.8	3.1	4.5	Ⅲ水戸, Ⅱ宇都宮, Ⅰ熊谷
13	'82.12.8	茨城県南西部	4.2	17	50	7.4	28.7	6.7	18.8	Ⅲ水戸・秋田, Ⅰ熊谷
14	'83.1.27	東京東部	4.6	30	60	3.2	8.4	6.5	8.3	Ⅲ東京, 熊谷, Ⅰ千葉
15	'83.2.22	千葉県北部	4.9	30	80	2.2	9.9	4.7	6.5	Ⅲ東京, Ⅱ千葉, Ⅰ熊谷
16	'83.2.27	茨城県南部	6.0	23	70	27.5	77.4	48.3	67.2	Ⅳ東京・銚子・宇都宮, Ⅲ熊谷

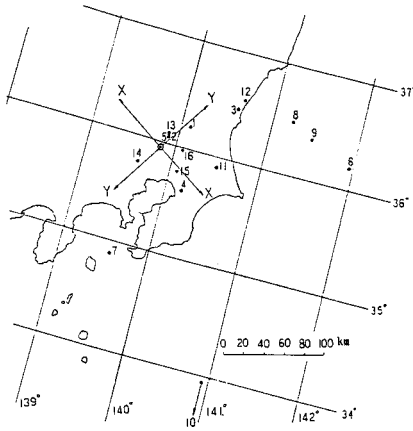


図-6 観測地震の震央位置

(3) 波形解析

内容液も含めたタンクの振動性状を調べるために、16回の全記録について加速度波形、鉄筋計・水圧計の出力波形をマイクロコンピュータによりA-D変換した後、フーリエスペクトルを算出した。A-D変換は時間刻み $\Delta t=0.02\text{ s}$ で行い、スペクトル算出に用いたデータ個数 $N=1024$ であり、移動平均による平滑化を4回行った。さらに、着目する2点のフーリエスペクトルの比を取って各種の周波数伝達関数を算出した。

4. 波形解析結果

(1) タンク躯体の振動特性

タンク底版の加速度波形のフーリエスペクトルを最大値を1.0に基準化して16回の全地震について重ね書きしたものを図-7に示す。この図よりタンク底版の動きは1 Hz~5 Hzの周波数成分がほとんどを占めていると考えられる。図-8、図-9におのおの、地表面およびタンク底版の加速度のGL-59 mに対する周波数伝達関数を示すが、両者ともに低次より、1.6 Hz、3.7 Hz近傍で増幅率が高く、低周波領域で地盤とタンクの動きに相関性がみられる。また、5 Hz以上の周波数領域では地表面に比べてタンク底版の増幅率は低く、図-7のスペクトルと同様の傾向を示している。

側壁頂部の底版に対する伝達関数を図-10(a) (X方向成分)、図-10(b) (Y方向成分)に示す。この図の比較から、X方向成分では17 Hz付近に顕著な増幅の山がみられるのに対して、Y方向成分ではこの周波数付近に増幅の山がみられないことがわかる。さらに、図-11、図-12に底版および側壁頂部におけるX、Y各成分の加速度波形およびパーティクル・オービットの例として、地震No.5の結果を示す。初期微動(0~3s)において底版の動きはX方向とY方向でほぼ同様であ

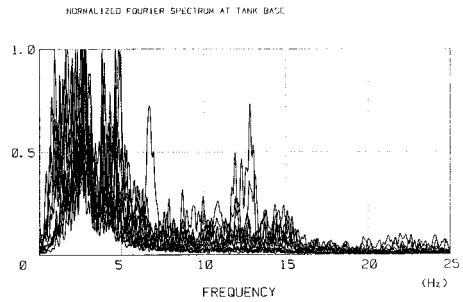


図-7 タンク底版波形のフーリエスペクトル

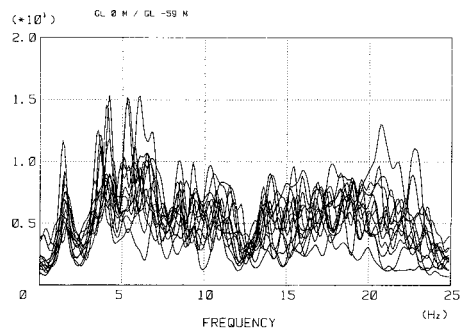


図-8 伝達関数 (地表面/GL-59 m)

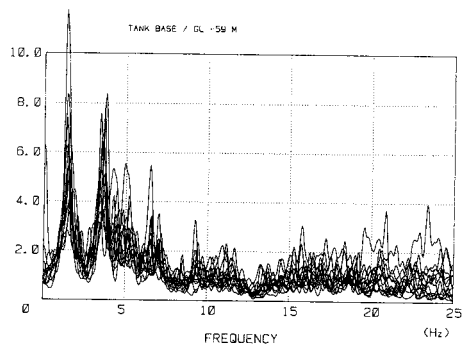
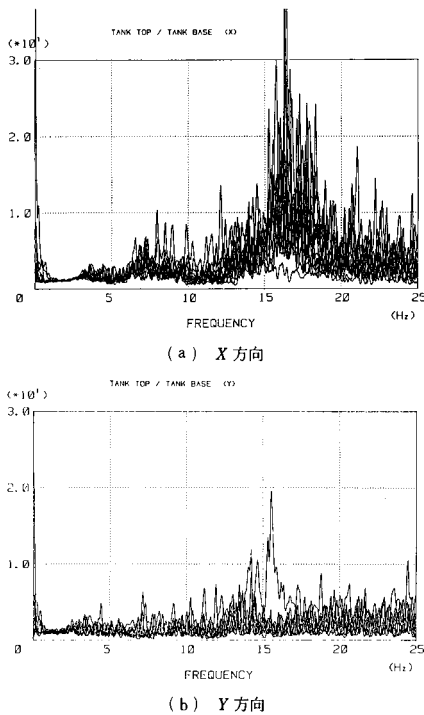


図-9 伝達関数 (底版/GL-59 m)

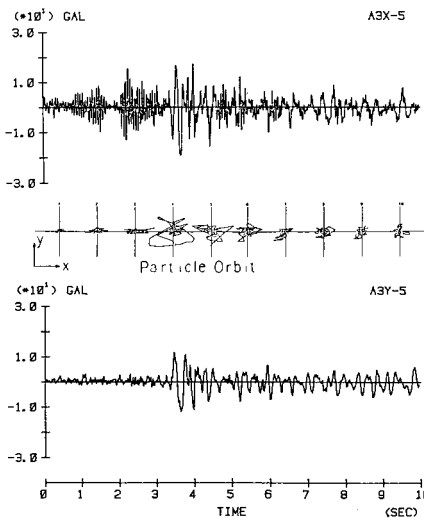
るのに対して、側壁頂部の動きはX方向が大きく、細長い軌跡を描いている。底版の加速度(A2X-5)の初期微動部分の周波数分析の結果では17 Hz近傍に卓越周波数が存在している。したがってこの周波数成分が増幅されたものと考えられる。X方向がタンクの半径方向、Y方向が接線方向を表わしているため、この17 Hz付近の変形モードでは、タンクの円形断面は真円が保たれなくなっていると考えられる。ただし、タンク底版の加速度波形の周波数成分(図-7)が5 Hz以下に集中しているため、この振動モードが躯体応力に及ぼす影響は少ないと思われる。

(2) 動水圧および側壁応力

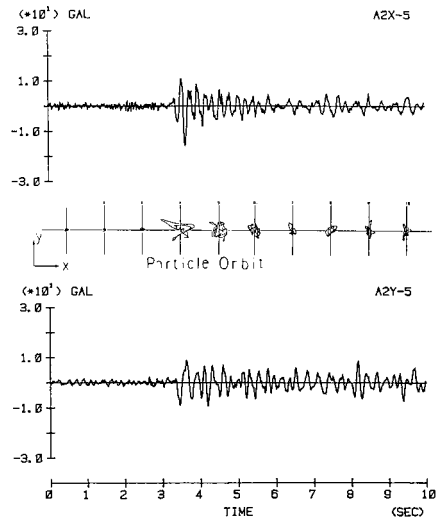
外殻の底版より高さ5.6 mの位置の水圧波形の底版



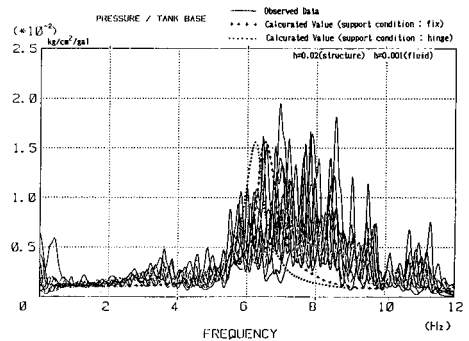
図一10 伝達関数 (側壁頂部/底版)



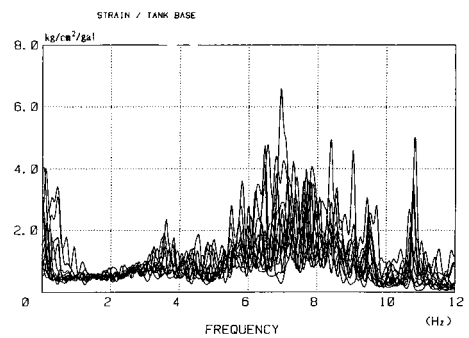
図一11 観測波形およびパーティクル・オービット (底版)



図一12 観測波形およびパーティクル・オービット (側壁頂部)



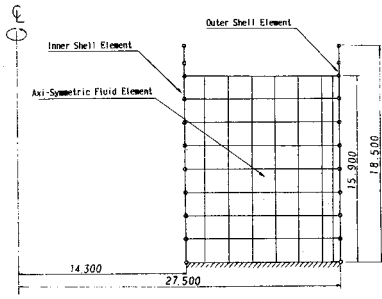
図一13 伝達関数 (水圧/底版加速度)



図一14 伝達関数 (鉄筋応力/底版加速度)

加速度波形に対する周波数伝達関数 (水圧/タンク底版) を図一13に、外殻支承部縦方向の鉄筋応力波形の底版加速度波形に対する周波数伝達関数 (鉄筋応力/タンク底版) を図一14に示す。これら2つの伝達関数は卓越周波数がよく対応しており、動水圧と側壁応力の間に強い相関性が存在し、両者ともに7 Hz付近に増幅特性がみられる。この結果は、動水圧が卓越する共振周波数が

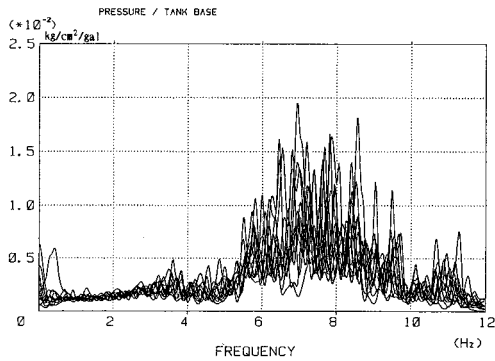
存在し、側壁に働く動水圧により側壁応力が発生することを示していると考えられる。なお、タンク内の水は地震 No.16の発生時を除いて、すべて満水状態 (水深 15.9 m) であった。地震 No.16の発生時は、タンク内の塗装作業のため、水位を 5.96 m に落としており図一13、図一14には除外している。



図一15 連成系有限要素モデル

表一4 内容液の固有振動数

モード次数	厳密解 (速度ポテンシャル理論)	有限要素解
1	0.0884 Hz	0.0884 Hz
2	0.248 Hz	0.254 Hz
3	0.345 Hz	0.379 Hz

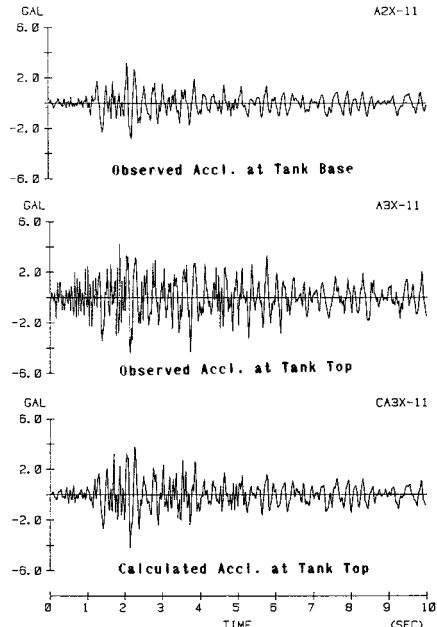


図一16 伝達関数の比較 (観測値 vs. 計算値)

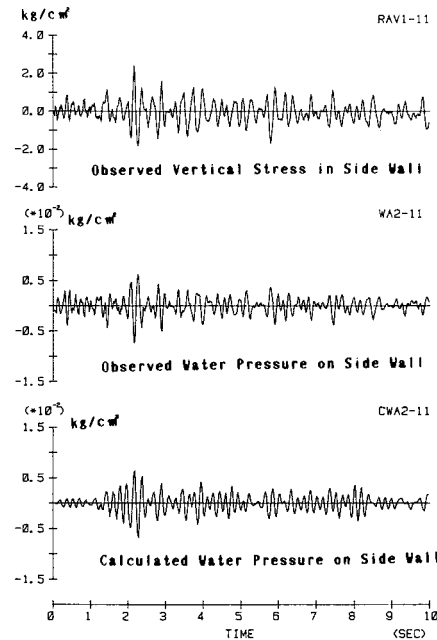
5. 数値解析による検討

地震観測により得られた結果を検討するために数値解析を行った。解析は、タンク躯体を剛体と仮定する速度ポテンシャルによる計算とタンクと内容液の連成振動を考慮する有限要素モデルによる計算の二通りの方法で行った。

連成解析に用いた有限要素モデルを図一15に示す。このモデルのうち流体要素のみのモード解析結果を表一4に厳密解と比較して示す。高次にゆくに従って誤差が生じているが、おおむね流体要素の妥当性を表わしている。さらに、図一15の連成振動モデルを用いて正弦波入力による周波数応答計算を行った。外殻の底版より高さ6.0 mの位置に作用する水圧の底版加速度に対する伝達関数を観測結果(図一13)と比較したものが図一16である。計算に際して、減衰定数は構造物2%、内容液0.1%とし、支承条件を完全固定とヒンジの二通りとした。観測結果は6 Hz以上の周波数領域でばらつきが大

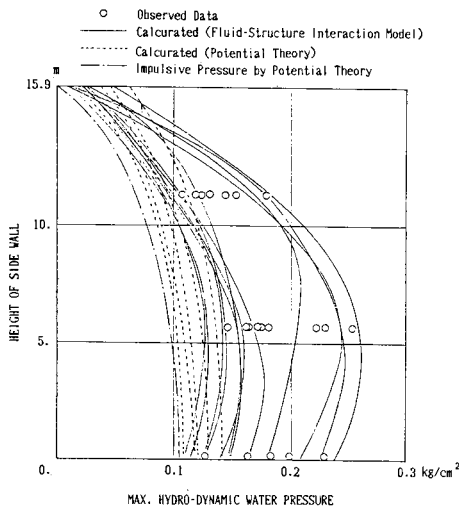


図一17 観測波形および計算波形 (加速度)

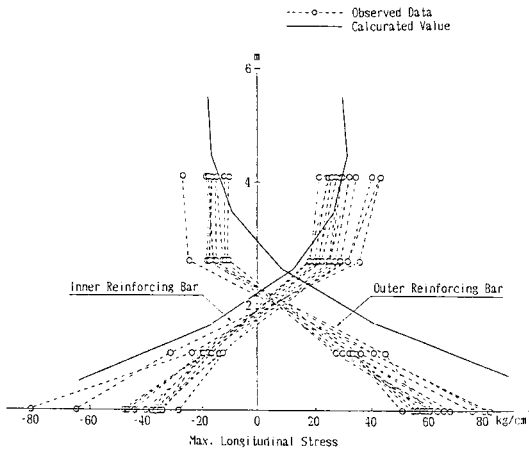


図一18 観測波形および計算波形 (鉄筋応力, 動水圧)

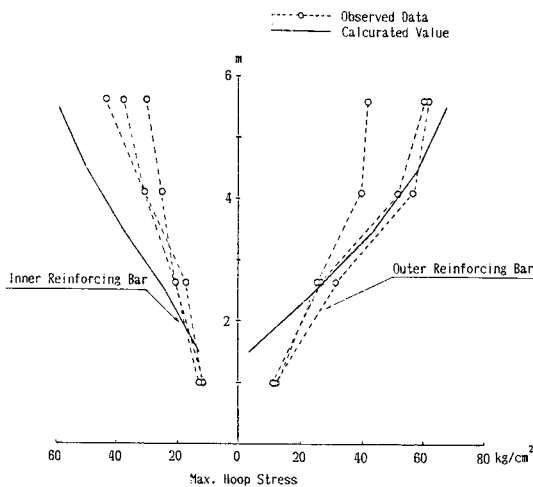
きいが、全体的にみると連成振動の影響で動水圧の増大する卓越周波数が現われることを示している。また、支承条件による差は小さく、計算による共振周波数は観測結果よりやや低く、7.5 Hz以上の周波数領域で観測値に比べて増幅度は小さい。しかし、図一7に示したように、底版加速度波形の周波数成分がほぼ5 Hz以下に集



図一十九 最大動水圧分布 (最大入力加速度を 100 gal に換算)



図一二十(a) 縦方向鉄筋応力分布 (100 gal 換算)



図一二十(b) 円周方向鉄筋応力分布 (100 gal 換算)

中していることを考慮すれば、この計算モデルにより妥当な結果が得られるものと思われる。

タンク底板位置の X 方向成分の観測波形を入力地震動として、No.16 を除く全地震について時刻歴応答解析を行った。計算に用いた減衰定数は、速度ポテンシャル理論については零とし、有限要素モデルについては連成振動の共振周波数に対して構造物 2%、内容液 0.1% とした。また、有限要素モデルの支承条件は完全固定とした。図一17、図一18 は観測波形と計算波形 (有限要素モデル) の例で地震 No.11 の結果である。全波形に関する計算結果と観測データの比較を図一19 に示す。図一19 は側壁に沿った最大動水圧分布を底板加速度の最大値を 100 gal として換算して図示したものである。この図は速度ポテンシャル理論による計算値が観測値より小さく、連成振動を考慮した有限要素モデルによる計算値が観測値とよく対応することを示している。さらに、図一19 の観測値の平均的な動水圧分布 (ポテンシャル理論による衝撃圧分布の 2 倍) が静的荷重として軸対称シェルに作用する場合の応力解析の結果から鉄筋応力を算出した。この計算値と観測された最大鉄筋応力分布の比較を図一20(a) (縦方向鉄筋応力)、図一20(b) (円周方向鉄筋応力) に示す。図一20(a) の底板近くの計算値と観測値が異なっている理由としては、計算の支承条件を完全固定としたが、実際の構造物ではややヒンジ的な挙動を示していたことが考えられる。側壁に発生する応力は、側壁に作用する動水圧により生ずるものと考え、これらの図において計算値と観測値がよく対応していることは、すなわち観測された動水圧分布が妥当な値であることを示しているものと思われる。

6. あとがき

二重殻構造のプレストレストコンクリート製実タンクの地震観測を行い、外殻に作用する動水圧について検討を行った。観測データを数値計算結果に基づいて検討したところ、以下の事項が明らかになった。

(1) タンク側壁の地震時応力は、側壁に作用する動水圧に最も影響を受ける。

(2) タンク側壁頂部の底板に対する応答倍率は、17 Hz 近傍で卓越する。このとき、タンクの円形断面には、真円が保たれなくなるような変形が生じている。この卓越周波数は底板加速度の周波数成分 (1 Hz~5 Hz) から大きくはずれており、側壁の地震時応力に及ぼす影響は少ないものと思われる。また、この振動モードは動水圧が卓越するモードとは異なっている。

(3) 動水圧の底板加速度に対する応答倍率は 6.5 Hz~8.5 Hz の間で卓越し、躯体と内容液の連成振動により発生する。また、側壁の鉄筋応力も同様の周波数領

域で増幅される。

(4) 躯体と内容液の連成振動が動水圧に与える影響は無視できないほど大きく、タンクを剛体と仮定する速度ポテンシャル理論より算定される衝撃圧分布の約2倍程度の動水圧が実際に発生している。

以上の結論は1つの観測事例から明らかにされたものであり、今後他のタンクにおける観測データの蓄積が望まれる。また、内殻についても同様の検討が必要であろう。さらに、二重殻タンクばかりでなく一重殻タンクにおいても、連成振動に着目した検討が必要になるものと思われる。

最後に、本研究を遂行するにあたりご指導を賜った埼玉大学工学部 久保慶三郎教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Housner, G.W. : Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the Seismologic Society of America, Vol. 47, 1957.
- 2) 曾我部潔・柴田 碧：円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第

- 1 報, 生産研究, Vol. 26, No. 3, 1974-3.
- 3) 曾我部潔・柴田 碧：円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第2 報, 生産研究, Vol. 26, No. 4, 1974-4.
- 4) 曾我部潔・柴田 碧：円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第3 報, 生産研究, Vol. 26, No. 8, 1974-8.
- 5) 池田駿介・秋山成興・中村広昭・白井伸一：円筒タンク内の液体動揺に関する研究, 土木学会論文報告集, 第290号, 1979-10.
- 6) 岡田純夫・坂井藤一・迫田治行・多田文三：有限要素法による大型液体タンクの地震応答解析(続報), 川崎技報, No. 61, 1976-8.
- 7) 忌部正博・渡辺宗樹・平井正雄：Earthquake Sloshing of Liquid in Annular and Cylindrical Tanks, 第6回地震工学シンポジウム講演集, pp. 1345~1352, 1982.
- 8) Aslam, M., Godden, W.G. and Scalise, D.T. : Earthquake Sloshing in Annular and Cylindrical Tanks, Proceeding of ASCE, Vol. 105, 1979.
- 9) たとえば, 川股重也：シェル構造解析(コンピュータによる構造工学講座), 培風館.
- 10) NASTRAN USER'S MANUAL (1984. 5. 16・受付)