

内容液と地盤との相互作用を考慮した コンクリート製液体貯蔵タンクの地震応答解析

中村秀明¹・森川慎吾²・麻生稔彦³・浜田純夫⁴

¹正会員 博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

²正会員 浅野工事株式会社 技術部 部長 (〒103-0023 東京都中央区日本橋本町4-9-11)

³正会員 博士(工学) 山口大学助教授 理工学研究科環境共生工学専攻(〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

⁴正会員 Ph.D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

コンクリート製液体貯蔵タンクは貯水、配水、調圧等を行う水道タンクの他に、下水処理施設、石油や低温液化ガスの貯蔵タンク、さらには原子力発電所の格納容器にまで幅広く用いられている。これらの構造物は人々の生活や人命に関わるため、高度な耐震性が要求される。本研究は、コンクリート製液体貯蔵タンクの地震時における挙動を正確に把握し、しかもできるだけ簡単に解析できることを目的に、内容液と地盤との動的相互作用を考慮に入れた地震応答解析法を示した。内容液は微小波高理論と速度ポテンシャル理論により定式化されており、内容液～構造物の連成解析が可能である。また、地盤の仮想境界には粘性境界が用いられており、構造物～地盤との相互作用が考慮されている。

Key Words : *tank-water interaction, tank-soil interaction, earthquake response analysis, viscous boundary, potential theory, axi-symmetric finite element analysis*

1. はじめに

コンクリート製円筒形液体貯蔵タンクは貯水、配水、調圧等を行う水道タンクの他に、下水処理施設、石油や低温液化ガスの貯蔵タンク、さらには原子力発電所の格納容器にまで用いられている。これらの構造物は人々の生活や人命に関わるため、地震時においても十分な液密性が要求される。地震時の液密性を確保するためには、まずコンクリートに発生する詳細な応力状態を把握し¹⁾²⁾³⁾、それに応じて円周および鉛直方向に適切なプレストレスを入れる必要がある。タンク内容液は、地震時にスロッシング、バルジングなどの挙動を示し、また液面動揺高、動液圧もタンク本体の挙動に与えるため非常に複雑な挙動となるためこれらを考慮した解析法が必要とされている。地上に建設されるコンクリート製円筒形液体貯蔵タンクの地震に対する安全性の検討は、タンク壁を剛体と仮定して地震力を静的な荷重に置換する慣用計算法を用いて行われてきた。このような計算法の代表的なものがG.W.Housnerの方法⁴⁾である。この方法では、水平加速度を受けた時の地震時動液圧を水平慣性力により引き起こされる液体の衝撃圧と液面動揺(スロッシング)による振動圧に分け、

それぞれ別個に求めている。最終的に内容液は、2質点～1バネ系の振動モデルに置換されている。一方、非粘性、非圧縮性液体に非回転を仮定した速度ポテンシャル理論からもHousnerとほぼ同様の結果が得られている⁵⁾⁶⁾。この方法では、内容液は最終的に多自由度の質点～バネ系モデルに置換されることになる。これらの方法は、いずれもタンク壁を剛体と仮定しており、内容液を質点～バネ系の振動モデルに置き換え計算を行う簡略計算法であり、比較的厚肉のタンクまたは、直径に比較して背の低いタンクに対しては、有効な方法といえる。

しかしながら、近年、用地の有効利用と施設の利用効率を高めるためタンクの大型化が進み、さらにタンクの直径に比較して背の高いタンクがつくられるようになってきた。このような大型のタンクや背の高いタンクの場合には、タンク自体の振動数がかなり低下してくるため、液面動揺の振動とタンクの構造系としての振動の両者が卓越してきて、従来の慣用計算法をそのまま適用するわけにはいなくなってきている。また、大型のタンクでは、タンク壁面の変形が動液圧に及ぼす影響を無視できないため、構造物を弾性体として取り扱い、直接内容液と連成させて解析する必要がある。タンク壁面の柔性を考

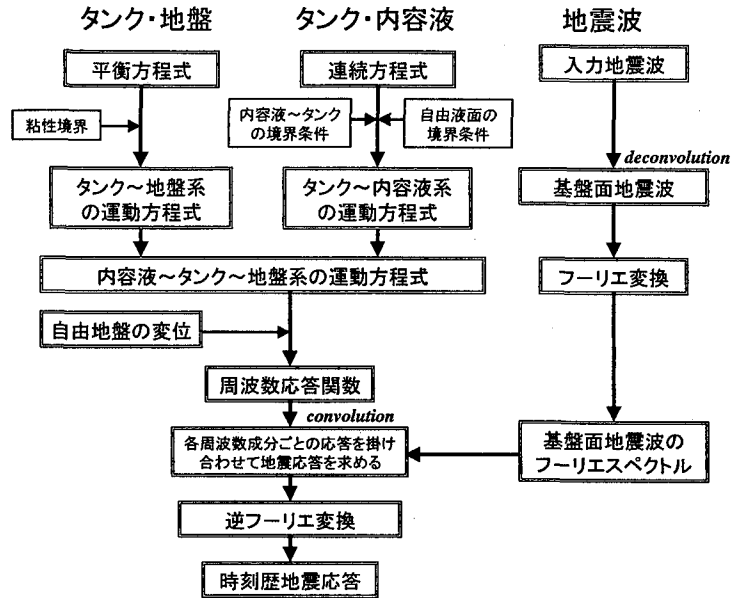


図-1 解析フローチャート

慮した計算方法は従来から開発されており、解析的方法⁷⁻¹⁰⁾と有限要素法¹¹⁻¹⁶⁾によるものに大別される。しかし、これらの解析には地盤の影響はあまり考慮されていない。タンクの地震時における挙動を正確に把握するためには、タンクと地盤との相互作用を考慮する必要がある¹⁷⁻²¹⁾。特にタンクの大型化によりタンク底面と地盤との接地面が広がるにつれて、地盤との相互干渉、地盤の減衰効果、杭の影響などを正しく取り入れた、タンク本体と基礎および地盤を一体とした連成解析が必要となってきている。また、都市圏における土地の有効利用、さらには埋立地へのタンクの建設などにより軟質地盤上にもタンクが建てられることが多くなってきている。軟質地盤上に建設されたタンクの動特性は地盤による影響を強く受ける。

そこで、本研究では、内容液の運動を速度ポテンシャル理論を用いて表し、内容液も有限要素としてモデル化し、従来一体にして解析することが困難であった内容液～タンク～地盤をすべて連成させた地震応答解析法を導く。従来このような解析では大型計算機が主に用いられていたが、本研究ではパソコンでも計算できるように、定式化に工夫を凝らし解析を行っている。基礎～地盤系の動的相互作用をFEMにより解析する場合、有限個の節点のみによって解析を行うため、半無限連続体である地盤の波動伝播に直接適用することはできない。そこで仮想境界を設けて有限な領域に置き換えるとともに、その境界において波の反射が生じないようにすることが

必要となる。本研究では、エネルギー吸収能はやや劣るものの、取り扱いが容易で付加的な自由度を要しない粘性境界²²⁾を用いて境界でのエネルギーの吸収を行った。この解析法と従来の慣用計算法との比較を行うとともに、タンクの剛性や地盤条件をいろいろ変えた解析を行い、タンクの剛性や地盤条件がタンク壁面の応力状態にどのような影響を与えているかを検討した。

2. 解析理論

1995年の阪神大震災以後、地震応答解析の関心は非線形解析にあるが、水密性が要求されるタンクでは、ひび割れ発生後の非線形領域での挙動より、ひび割れ発生までの線形領域での挙動が特に重要となる。そこで、本研究では、線形解析ではあるが、タンクと地盤との相互作用、タンクと内容液との相互作用を考慮に入れ、できるだけ精度が高く、しかも手軽に種々の入力地震動に対する応答が計算できる解析手法を示した。解析のフローチャートを図-1に示す。まず、単位加速度に対する周波数応答を求め、それを入力地震波に対するフーリエスペクトルを掛け合わせ、逆フーリエ変換することにより時刻歴応答を求めている。この解析法では、単位加速度に対する周波数応答を一度計算しておけば良く、後は種々の入力地震波に対するフーリエスペクトルを掛け合わせ、逆フーリエ変換するだけで種々の入力地震波に対する時刻歴応答が求められる。

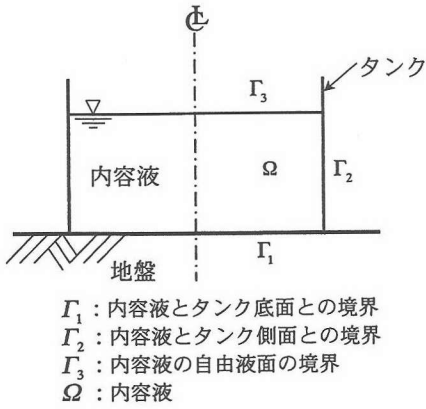


図-2 領域と記号

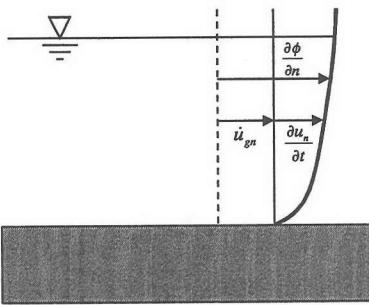


図-3 タンク接水面での境界条件

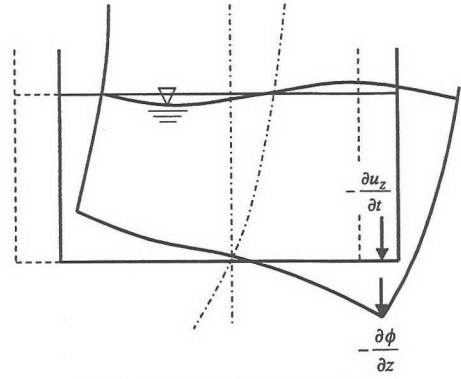


図-4 タンク底面での境界条件

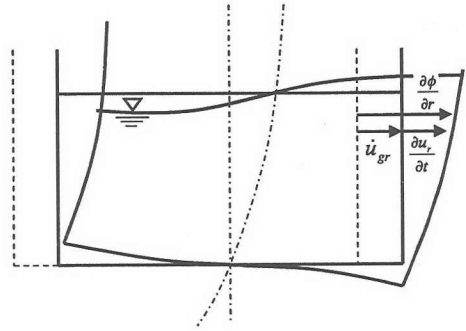


図-5 タンク側面での境界条件

(1) タンク～内容液の運動方程式と境界条件

a) 内容液の運動方程式

図-2に示すような境界 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ で囲まれた領域 Ω における内容液の運動について考える。内容液は非粘性、非圧縮性であり、その運動は非回転であると仮定し、微小振幅理論が適用できるものとする。速度ポテンシャル ϕ が定義でき、内容液の運動方程式は次のように表される。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

ここで ϕ は速度ポテンシャルで、流速と次のような関係がある。

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = v_r, \quad \frac{\partial \phi}{r \partial \theta} = v_\theta, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = v_z \quad (2)$$

また、 ∇ はラプラスの演算子であり、軸対称問題では、次のように表される。

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3)$$

b) タンク接水面での境界条件

タンクと内容液の境界上では流体速度の垂直成分は壁面の速度と同じであるので、タンク接水面での一般的な境界条件は次式で与えられる。(図-3参照)

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \dot{u}_{gn} + \frac{\partial u_n}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、 \dot{u}_{gn} はタンク基部の速度のタンク接水面に対する法線方向成分、 u_n はタンク接水面とタンク基部との相対変位の接水面法線方向成分（外向きが正）、 $\frac{\partial}{\partial n}$ は接水面法線方向微分を示す。（外向きが正）接水面が一様に動くときと仮定する場合 u_n を 0 とおく。タンク底面と側面について式(4)を具体的に書き表すとそれぞれ式(5)および式(6)となる。

【タンク底面】タンク底面と内容液のタンク底面に垂直な方向の速度成分を等しく置く。(図-4参照)

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial u_z}{\partial t} \quad \text{境界 } \Gamma_1 (z=0) \quad (5)$$

ここで、 u_z はタンク底面の変位で上向きを正としている。

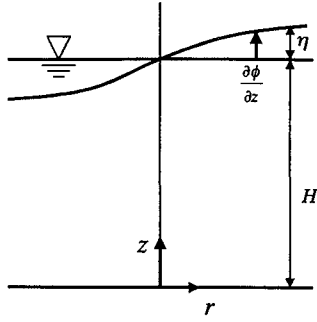


図-6 自由表面での境界条件

【タンク側面】タンク側面と内容液の r 方向の速度成分を等しく置く。(図-5参照)

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = \dot{u}_r + \frac{\partial u_r}{\partial t} \quad \text{境界 } \Gamma_2 (r = R) \quad (6)$$

ここで、 u_r はタンク側面の r 方向変位で外向きを正としている。 \dot{u}_r は地動速度である。

c) 内容液の自由表面の境界条件

自由液面の運動方程式は次式となる²³⁾。

$$\left(\frac{P}{\rho_w} \right)_{z=H+\eta} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=H+\eta} - \frac{1}{2} (\dot{u}_t^2 + \dot{v}_t^2 + \dot{w}_t^2)_{z=H+\eta} - g\eta \quad (7)$$

ここで、 ρ_w は内容液の密度、 g は重力加速度であり、 η は図-6に示す座標系で考えるとき、静止液面の (r, θ, H) なる座標点から上で時間 t における自由液面の高さを示す。

自由液面の圧力は大気圧となることを考慮して微小波高理論の下に微小項を省略すると次式が得られる。

$$\eta = \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=H} \quad (8)$$

一方、自由液面の鉛直方向の内容液の速度も同様に液面自身の法線方向速度に等しいと見なせるので、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (9)$$

式(8)、(9)より自由液面の境界条件が得られる。

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{z=H} = 0 \quad (10)$$

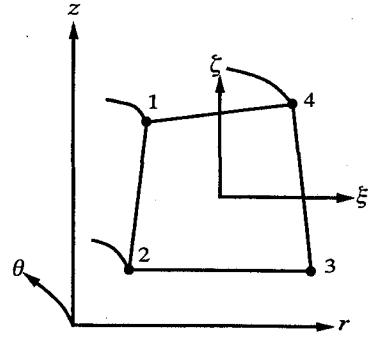


図-7 アイソパラメトリックリング要素

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = - \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (11)$$

(2) 有限要素法による定式化

解析対象領域を図-7に示すアイソパラメトリックリング要素で分割し、節点における速度ポテンシャル ϕ を θ 方向にフーリエ級数展開し、その振幅をフーリエ速度ポテンシャル Φ とすると、次式のように表される。

$$\phi(r, \theta, z; t) = \Phi(r, z; t) \cos m\theta \quad (12)$$

ここで m はフーリエ次数であり、水平に一樣な地震に対しては、 $m = 1$ のみを考える。

Galerkin法により有限要素法のための定式化を行う。

$$\int_V \delta \phi \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) dv = 0 \quad (13)$$

式(13)に式(12)を代入すると、

$$\int_V \delta \Phi \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right\} \cos^2 m\theta dv - \frac{m^2}{r^2} \int_V \delta \Phi \cdot \Phi \cos^2 m\theta dv = 0 \quad (14)$$

となる。次に部分積分(付録参照)の公式を用いて式(14)の左辺第1項を変形し、 ρ_w を乗じて整理すると次式となる。

$$\begin{aligned} & \rho_w \int_V \left(\frac{\partial \delta \Phi}{\partial r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial \delta \Phi}{\partial z} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \cos^2 m\theta dv \\ & + \rho_w \frac{m^2}{r^2} \int_V \delta \Phi \cdot \Phi \cos^2 m\theta dv \\ & = \rho_w \int_S \delta \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial n} \cos^2 m\theta ds \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、式(15)の右辺は境界条件より定まる項である。形状関数を用いて、要素内の速度ポテンシャルを次のように表現する。

$$\Phi = [N]\{\Phi\} \quad (16)$$

$$\text{ただし, } [N] = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$$

$$\{\Phi\} = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n\}^T$$

n は要素を構成する節点数。

式(16)を式(15)に代入し、 $\int_0^{2\pi} \cos^2 m\theta d\theta = \pi$ の関係を用いて書き直すと、

$$\begin{aligned} & \pi\rho_w \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [B] r |J| d\xi d\eta \{\Phi\} \\ & + \pi\rho_w \frac{m^2}{r^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N]^T [N] r |J| d\xi d\eta \{\Phi\} \\ = & -\frac{\rho_w}{g} \pi \int_{-1}^1 [N]^T [N] r |J| d\xi \{\ddot{\Phi}\} \quad (\text{自由水面}) \\ & -\pi\rho_w \int_{-1}^1 [N]^T [N]^* r |J| d\xi \{\dot{u}_b\} \quad (\text{タンク底面}) \\ & + \pi\rho_w \int_{-1}^1 [N]^T [N]^* r |J| d\eta \{\dot{u}_r + \dot{u}_g\} \quad (\text{タンク側面}) \end{aligned} \quad (17)$$

となる。ただし、

$$[N]^* = [n_r, n_\theta, n_z] [\tilde{N}] \quad (18)$$

$$[\tilde{N}] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

n_r, n_θ, n_z は法線の r, θ, z 成分である。タンク底面では、 $n_r = 0, n_\theta = 0, n_z = 1$ であり、 $\{\dot{u}_b\}$ はタンク底面を構成している節点の変位となる。また、タンク側面では、 $n_r = 1, n_\theta = 0, n_z = 0$ であり、 $\{\dot{u}_r\}$ はタンク側面を構成している節点の変位となる。また、 $[B], [J]$ は次式で与えられる。

$$[B] = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \xi} r_i & \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \xi} z_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \eta} r_i & \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(17)を次のように置くことで内容液系の運動方程式である式(27)を導くことができる。

$$[M_\Phi] = \frac{\rho_w}{g} \pi \int_{-1}^1 [N]^T [N] r |J| d\xi \quad (22)$$

(自由水面のみ)

$$\begin{aligned} [K_\Phi] = & \pi\rho_w \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [B] r |J| d\xi d\eta \\ & + \pi\rho_w \frac{m^2}{r^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N]^T [N] r |J| d\xi d\eta \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} [C_{\Phi T}] = & -\pi\rho_w \int_{-1}^1 [N]^T [N]^* r |J| d\xi \\ & + \pi\rho_w \int_{-1}^1 [N]^T [N]^* r |J| d\eta \end{aligned} \quad (24)$$

(タンク底面のみ)

(タンク側面のみ)

$$\{f_\Phi\} = \pi\rho_w \int_{-1}^1 [N]^T [N]^* r |J| d\eta \{Y\} \dot{u}_g \quad (25)$$

(タンク側面のみ)

$$\{\dot{u}\} = \{\dot{u}_b\} + \{\dot{u}_r\} \quad (26)$$

$$[M_\Phi] \{\ddot{\Phi}\} - [C_{\Phi T}] \{\dot{u}\} + [K_\Phi] \{\Phi\} = \{f_\Phi\} \quad (27)$$

ここに、 $\{\dot{u}\}$ は内容液に接する節点の速度ベクトルで、 $\{Y\} = \{110110 \dots 110\}^T$ である。

また、動水圧は次式で与えられる。

$$P_d = -\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (28)$$

従って、構造物に作用する動水圧に基づく節点力は次式で表される。

$$\begin{aligned} \{f_p\} = & \left(\pi\rho_w \int_{-1}^1 [N]^T [N] r |J| d\xi \right. \\ & \left. + \pi\rho_w \int_{-1}^1 [N]^T [N]^* r |J| d\eta \right) \{\dot{\Phi}\} \\ = & -[C_{\Phi T}]^T \{\dot{\Phi}\} \end{aligned} \quad (29)$$

(3) 粘性境界を導入したタンク～地盤動的相互作用系の解析

本研究では、半無限の地盤上に建設されたタンクを対象としている。有限要素法では、半無限に広がる地盤のうち有限な領域しか解析しえないから仮想の境界が生じる(図-8参照)。そこで本研究では、地盤モデルの側方および底面には、遠方地盤の剛性やエネルギー逸散効果を考慮した粘性境界を用いた。粘性境界を導入した相互作用系の運動方程式は次のように書くことができる²²⁾。

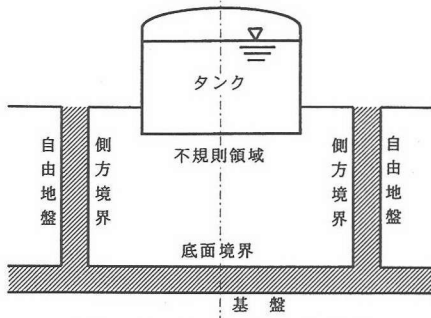


図-8 タンク～地盤相互作用系

$$\begin{aligned}
 & [M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} \\
 & \quad + [C_B]\{\dot{u}\} + [C_S]\{\dot{u}\} - \{\dot{u}_f\} \\
 & = -[M]\{I\}\ddot{u}_g + \{f\} \\
 & \quad + [G_S]\{u_f\} + [G_{CS}]\{\dot{u}_f\}
 \end{aligned} \quad (30)$$

ここに、

- $[M]$: 解析領域の質量マトリクス
- $[C]$: 解析領域の減衰マトリクス
- $[K]$: 解析領域の剛性マトリクス
- $[C_B]$: 底面での粘性境界マトリクス
- $[C_S]$: 側方自由地盤における粘性境界マトリクス
- $[G_S]$: 側方境界剛性マトリクス
- $[G_{CS}]$: 側方境界減衰マトリクス
- $\{u_f\}$: 自由地盤の変位ベクトル
- $\{\dot{u}_f\}$: 自由地盤の速度ベクトル
- $\{I\}$: 加振方向に応じて0, 1を与えるベクトル
- $\{f\}$: 物体力ベクトル
- \ddot{u}_g : 基盤面加速度

なお、マトリクス $[C_B]$ 、 $[C_S]$ 、 $[G_S]$ 、 $[G_{CS}]$ の詳しい内容については、付録を参照されたい。

式(30)を未知量と既知量に分けて整理すると次式となる。

$$\begin{aligned}
 & [M]\{\ddot{u}\} + ([C] + [C_B] + [C_S])\{\dot{u}\} + [K]\{u\} \\
 & = -[M]\{I\}\ddot{u}_g + \{f\} + [C_S]\{\dot{u}_f\} \\
 & \quad + [G_S]\{u_f\} + [G_{CS}]\{\dot{u}_f\}
 \end{aligned} \quad (31)$$

(4) 内容液～タンク～地盤連成系の運動方程式

内容液～タンク～地盤のすべてを連成させた系の運動方程式は、内容液系の運動方程式である式(27)とタンク～地盤系の運動方程式である式(31)に内容液からの動水圧に基づく節点力である式(29)を加えたものを組み合わせて次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_T & C_{\phi T}^T \\ -C_{\phi T} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_S \\ f_\phi \end{bmatrix} \quad (32)$$

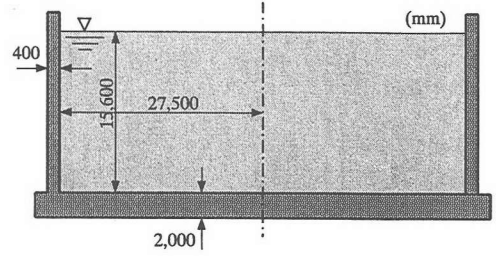


図-9 P C円筒形タンク(内容液～タンク)

$$\text{ここで、} [C_T] = [C] + [C_B] + [C_S] \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
 \{P_S\} = & -[M]\{I\}\ddot{u}_g + \{f\} + [C_S]\{\dot{u}_f\} \\
 & + [G_S]\{u_f\} + [G_{CS}]\{\dot{u}_f\}
 \end{aligned} \quad (34)$$

式(32)の運動方程式は非対称となるため、次のように変形して対称にする。

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & -M_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ -\ddot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_T & -C_{\phi T}^T \\ -C_{\phi T} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ -\dot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -K_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ -\Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_S \\ f_\phi \end{bmatrix} \quad (35)$$

式(35)を解くことにより内容液～地盤～タンク連成系の解が求められる。

3. 数値解析例

(1) 内容液～タンク連成系の解析

a) 解析モデル・解析条件

内容液とタンクが連成する系の解析例として図-9に示す内径55mのP C円筒形タンクを取り上げ解析を行った。解析では、まず始めに液体要素のメッシュ寸法の検討を行った。入力地震波はEl Centro NS成分(1940年Imperial Valley地震、最大加速度392gal)を用い解析を行った。比較検討に用いた有限要素メッシュを図-10に示し、メッシュ分割数、サイズを表-1に示す。また、内容液、タンクの物性値は表-2に示すとおりである。メッシュ寸法を検討した後、水槽内部の内容液を仮想分布質量と考える簡略法²⁴⁾およびHousner理論⁴⁾との比較を行った。入力地震波はEl Centro NS成分(1940年Imperial Valley地震)と長周期成分が卓越するHachinohe NS成分(1968年十勝沖地震)ならびに神戸海洋気象台で観測されたHanshin NS(1995年兵庫県南部地震)をそれぞれ最大加速度を196galに修正したものをを用いた。なお、簡略法で用いる水平震度 k_h は入力加速度 α の

表-1 有限要素メッシュ分割数

	タンク部分		内容液部分		メッシュサイズ (m)	
	要素数	節点数	要素数	節点数	幅	高さ
mesh-1	49	98	493	540	0.95	0.92
mesh-2	27	54	135	160	1.9	1.84
mesh-3	25	52	85	108	5.5	0.92

表-2 タンク諸元および材料特性値

容量	37100m ³	内容液単位体積重量	9806.65
水深	15.6m	N/m ³ (kgf/m ³)	(1000.0)
内径	55.0m	タンク単位体積重量	24500
壁厚	0.4m	N/m ³ (kgf/m ³)	(2500)
高さ	19.0m	ヤング係数	3.43×10 ⁴
底版厚	2.0m	N/mm ² (kgf/m ²)	(3.5×10 ⁹)
		ポアソン比	0.2

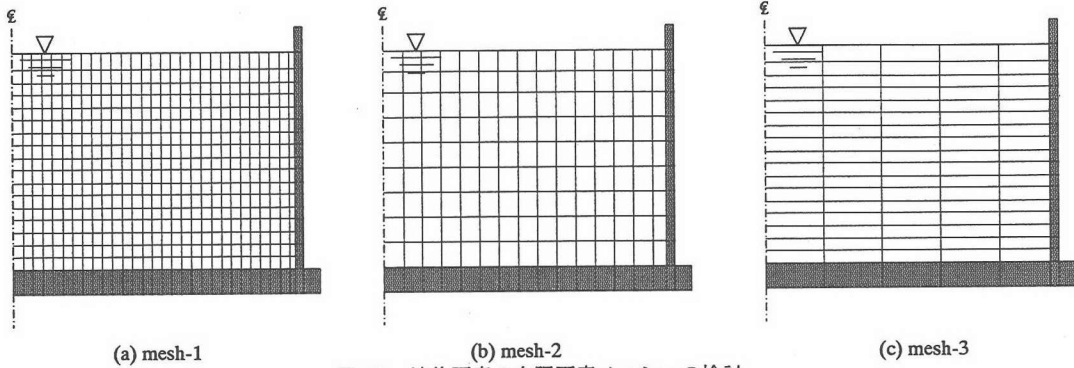


図-10 液体要素の有限要素メッシュの検討

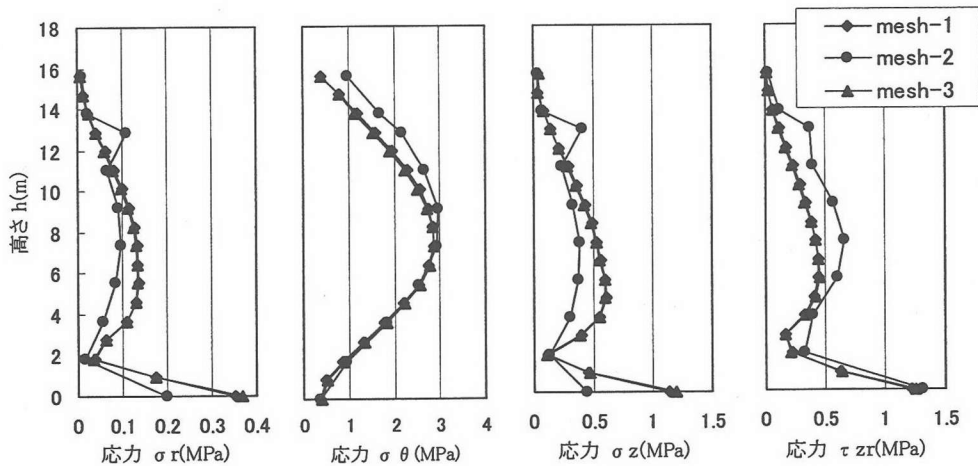


図-11 メッシュ分割数の違いによるタンク壁面の応力

最大値が196galであることを考慮し、 $k_h = \alpha / g$ (g : 重力加速度) より求めた。解析は周波数領域で時間刻み0.02secで行った。

b) 解析結果

メッシュサイズの検討

メッシュ分割数の違いによるタンク壁面に生じる応力分布を図-11に示し、タンク壁面に生じる最大動水圧の分布を図-12に示す。

まず、mesh-1とmesh-2を比較する。mesh-2はmesh-1に比べ要素のメッシュサイズが幅、高さともにほぼ倍になっている。タンク壁面に生じる応力では、mesh-1とmesh-2では最大で500kPa以上の差が生じて

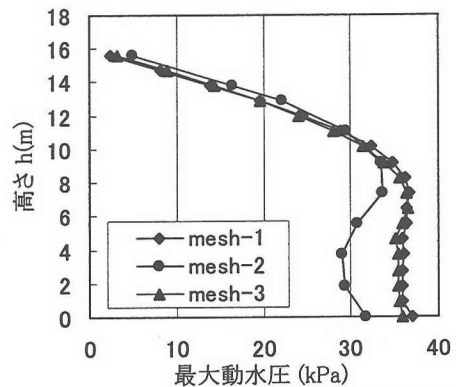


図-12 メッシュ分割数の違いによる最大動水圧

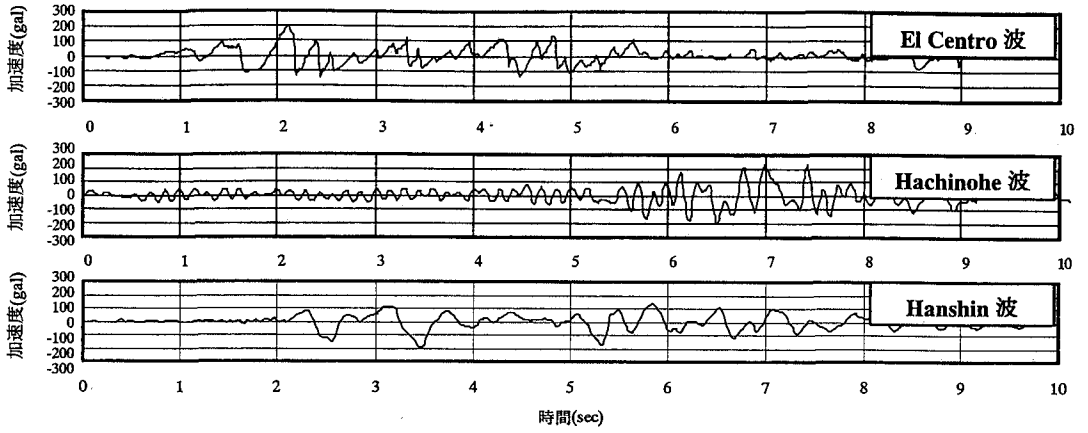


図-13 入力地震波（最大加速度を196galに修正）

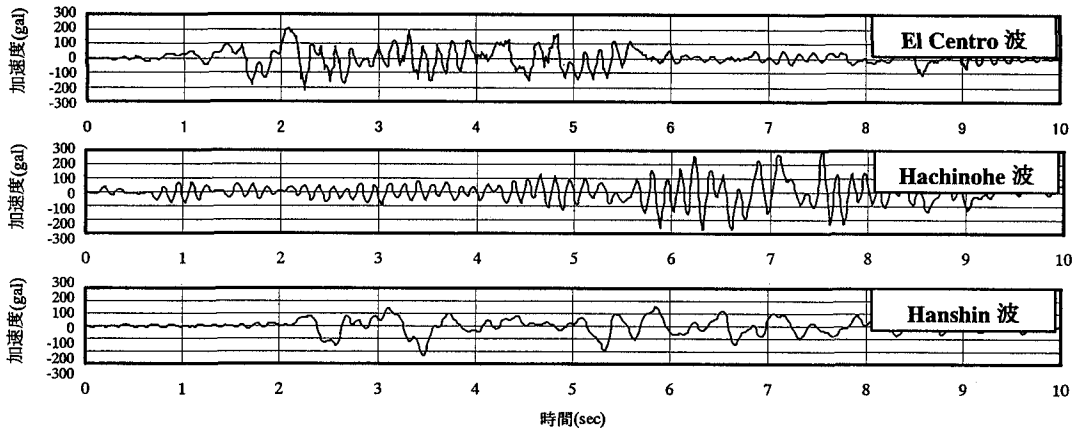


図-14 応答加速度

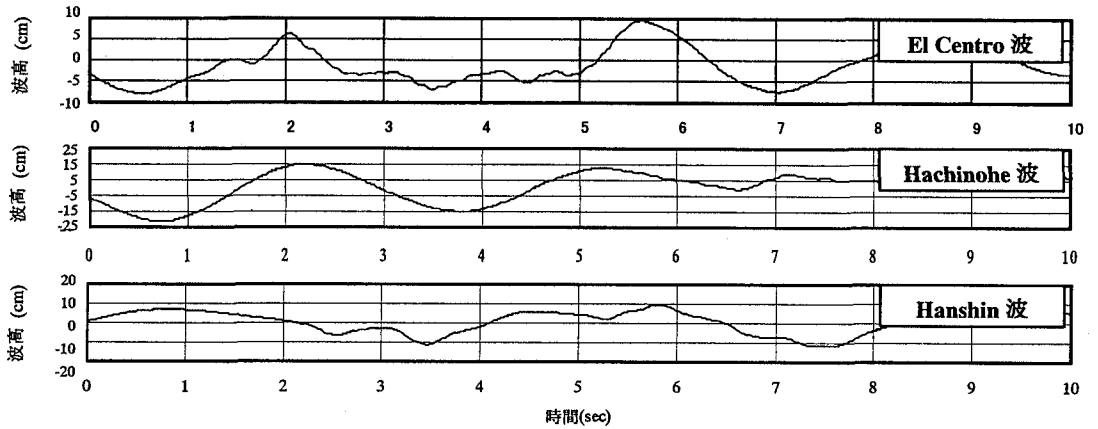


図-15 応答波高

いる。また最大動水圧についても、7kPa程度の差が生じている。別途行った解析では、要素のメッシュサイズは約 $1\text{m} \times 1\text{m}$ で収束しており、mesh-2のメッシュサイズでは、十分な精度で解析が行えないもの

と思われる。

次に、mesh-1とmesh-3を比較する。mesh-3はmesh-1のメッシュサイズに比べ、高さは同じであるが、幅を5.5mとかなり長くとしている。しかしながら、

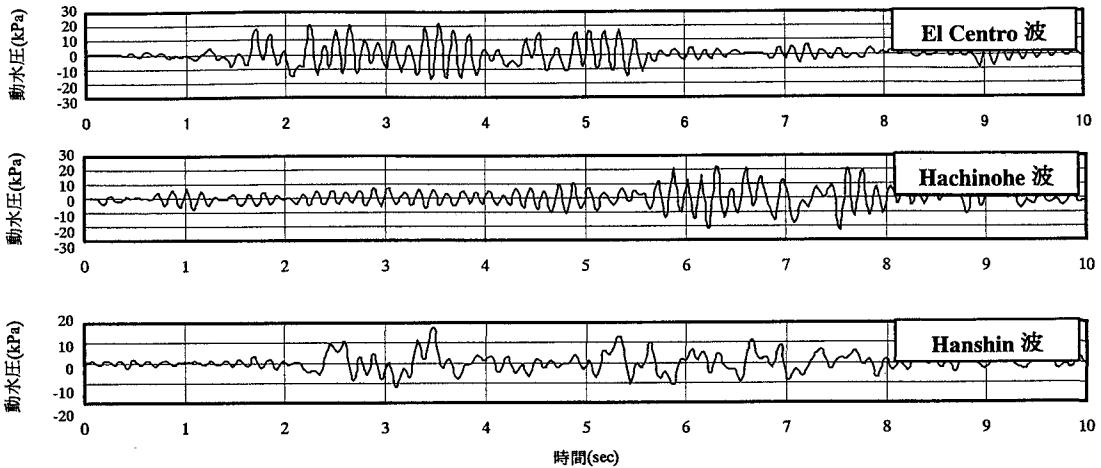


図-16 応答動水圧

応力および最大動水圧はmesh-1とほとんど同じであり、高さ方向のメッシュサイズを1m程度に分割していれば、幅方向はある程度長くても解析精度には、あまり影響を与えないことがわかる。本研究では、できるだけ計算容量を減らし、パソコンでも計算できるように高さ方向は1mに分割し、幅方向は5.5mの要素分割で計算を行う。

タンク～内容液連成系の解析結果

入力地震波としてEl Centro波、Hachinohe波、Hanshin波（図-13参照）を入力した時の水面付近のタンク側壁の加速度を図-14に、その位置での波高を図-15に、また動水圧が最大となるタンク底面より6mの位置でのタンク側壁に及ぼす動水圧の時刻歴をそれぞれ図-16に示す。図-14はタンクの水面付近での応答加速度である。応答加速度は入力加速度に似た波形になっている。図-15は液面波高の時刻歴であるが、どれもスロッシング現象が生じているため、固有周期が約3秒と長くなっている。Hachinohe波入力時の波高はEl Centro波入力時の波高の約2倍あるが、これは長周期成分の卓越したHachinohe波の方が内容液の固有振動周期に近いためと考えられる。図-16は動水圧が最大となるタンク底版より6mの位置での動水圧の時刻歴応答である。どれも波高の時刻歴が滑らかなところでは動水圧の値は小さく、波高の時刻歴が小刻みに振幅しているところでは動水圧の値が大きくなっている。前者の場合は内容液のスロッシング現象により主に振動圧が側壁に作用している状態であり、後者の場合はバルジングにより主に衝撃圧が側壁に作用している状態であると考えられる。従来の慣用計算法で算出された動水圧分布との比較を行うため、タンク側壁各点に生じる動水

圧の時刻歴の最大値を図-17に示す。Housnerの方法により算出された動水圧については、衝撃圧(impact pressure:ip)と振動圧(convective pressure:cp)に分けたものについて示す。簡略法による動水圧は衝撃圧のみとなっているので振動圧を加算する必要がある。

簡略法とHousnerとの比較では高さが6m以上では簡略法の動水圧がHousnerの動水圧よりも高く、高さが6m以下ではその逆となっている。この両者の動水圧と有限要素法による動水圧とを比較すると、簡略法による動水圧の方が有限要素法による動水圧に近いことがわかる。簡略法やHousnerによる方法はタンク壁を剛と仮定して算出しているため、タンク底部で動水圧が大きくなっている。有限要素法による方法のようにタンク壁を剛と仮定しない場合には、タンク壁の変形によって生じる圧力（変形圧）が生じるために、変形が最大となるタンク中間部での動水圧が最大となる。また、タンク中間部の変形に比較してタンク下部の変形は小さいために、剛なタンクのようにタンク底面で動水圧が最大になるとは限らない。タンクの変形量が大きくなるにつれて変形圧の影響が大きくなり、この結果として従来の慣用計算法ではタンク側壁下部の動水圧を大きく見積もり、タンク中間部の動水圧を小さく見積もる傾向がある。

(2) タンク形状による応答の違い

a) 解析モデル・解析条件

タンク形状（内径、高さ）による応答の違いを調べるため、内径が20m、水深が22.1mのモデル1を標準とし、内径、高さを変えた6種類のモデルについて解析を行った。タンクの形状をまとめたものを

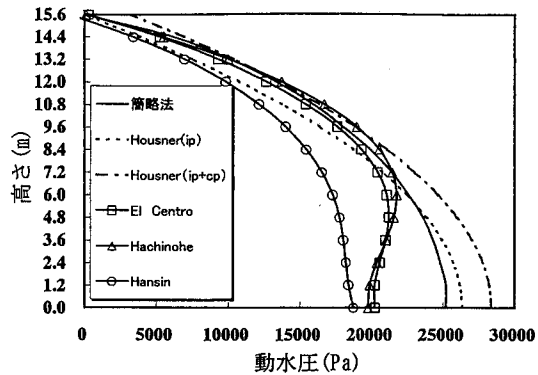


図-17 動水圧分布

表-3 タンクの形状寸法

	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4	モデル5	モデル6
容量(m ³)	6943	27772	62486	140594	10414	13886
水深(m)	22.1	22.1	22.1	22.1	33.15	44.2
内径(m)	20.0	40.0	60.0	90.0	20.0	20.0
壁厚(m)	0.2	0.4	0.6	0.9	0.245	0.283
底版厚(m)	0.4	0.8	1.2	1.8	0.490	0.566

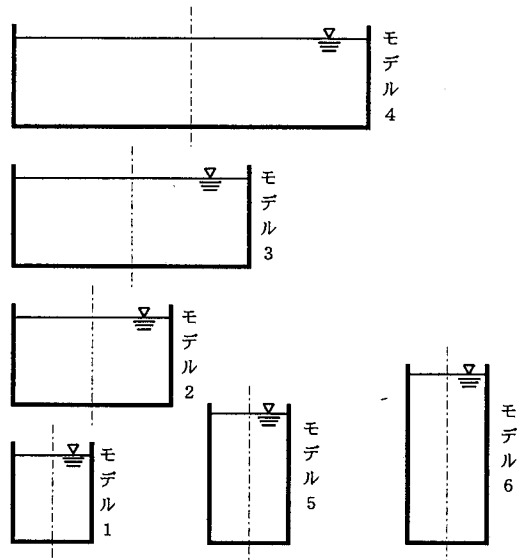


図-18 タンク形状

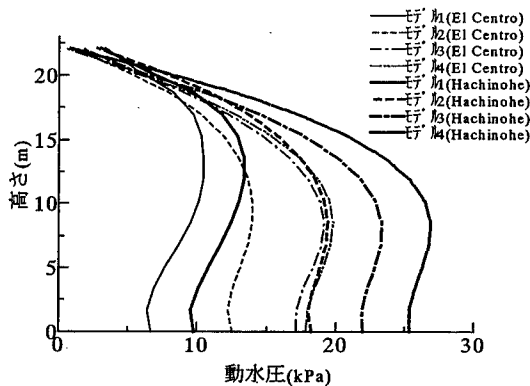


図-19 内径の違いによる動水圧分布

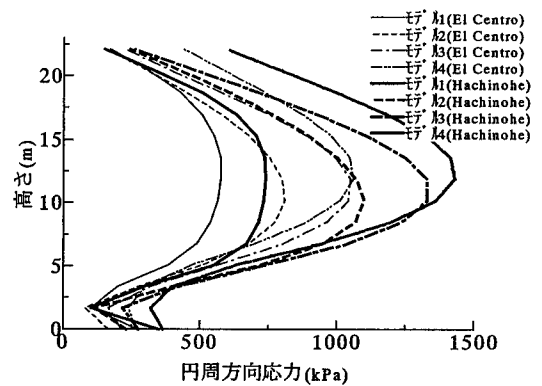


図-21 内径の違いによる円周方向応力分布

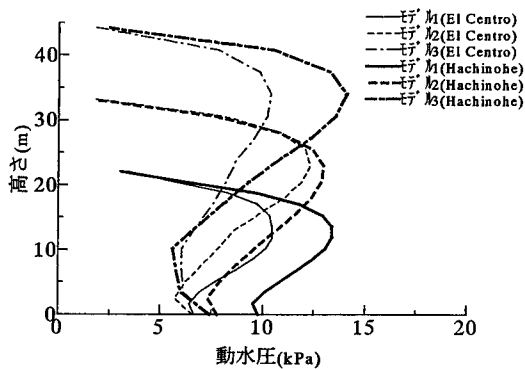


図-20 高さの違いによる動水圧分布

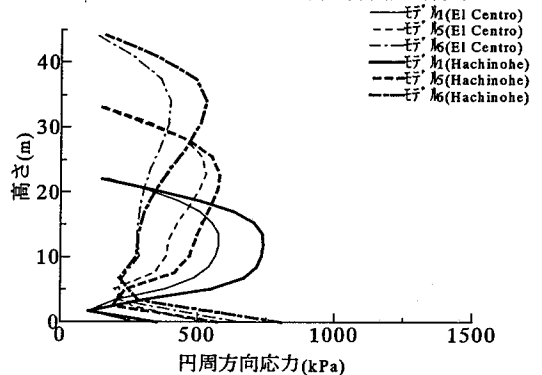


図-22 高さの違いによる円周方向応力分布

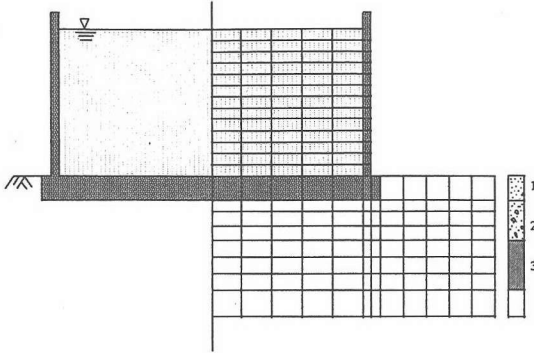


図-23 有限要素メッシュの一例

図-18および表-3に示す。なお、タンクの壁厚、底版厚については、文献25)に準じ容量の関係より求めた。また、タンクおよび内容液の材料定数は表-2に示したものと同一である。

b) 解析結果

図-19にタンクの高さが22.1mと一定で、内径がそれぞれ異なるモデル1, 2, 3, 4の4種類のモデルについてタンク側壁に生じる動水圧分布を示す。タンク側壁に作用する動水圧は、タンクの内径が大きくなるほど大きくなり、またEl Centro波に比べ長期成分を多く含むHachinohe波の方が大きくなっている。動水圧が最大となる位置はモデル1を除いてほしいタンク中央部付近であり、タンクの変形状態により変形圧に差が生じたと考えられる。図-20にはタンクの内径が20mと一定で、タンクの高さが異なるモデル1, 5, 6のタンク側壁に生じる動水圧分布を示す。タンクが高くなってもタンク底面付近での動水圧はほぼ同じである。これは、タンクがある程度以上高くなると衝撃圧の示す割合が多くなり、振動圧、変形圧の影響が小さくなるのが原因と考えられる。図-21に内径の違いによる円周方向応力の分布を示す。動水圧が大きいところは円周方向応力も大きくなっており、Hachinohe波の方が大きな応力が発生している。図-22には高さの違いによる円周方向応力の分布を示す。これも動水圧の分布と非常に良く似ている。

(3) 内容液～タンク～地盤連成系の解析

タンクの地震時における挙動を正確に把握するためには、タンクと地盤との相互作用を考慮する必要があり、特にタンクの大型化によりタンク底面と地盤との接地面が広がるにつれて、地盤との相互干渉、

表-4 地盤の材料特性値

地盤種別	層	V_{Si} m/s	γ_i kg/m ³	H_i m	$4H_i/V_s$	T_G sec
I種	1層	333.3	2100.0	2.7	0.01	0.03
	2層	321.5	2100.0	2.3	0.01	
	3層	398.8	2100.0	3.7	0.01	
II種	1層	164.5	1400.0	8.2	0.20	0.44
	2層	182.0	1400.0	6.1	0.13	
	3層	316.1	2100.0	8.4	0.11	
III種	1層	55.0	1130.0	1.3	0.09	1.63
	2層	40.0	1130.0	5.2	0.52	
	3層	50.0	1440.0	3.5	0.28	
	4層	65.0	1350.0	4.0	0.25	
	5層	55.0	1350.0	5.5	0.40	
	6層	100.0	1530.0	2.3	0.09	
基盤		750.0	2100.0	3.0	—	—

地盤の減衰効果、杭の影響などを正しく取り入れてタンク本体と地盤および基礎を一体とした連成解析が必要となってきている。そこで内容液～タンク～地盤および基礎をすべて連成させた解析を行う。

a) 解析モデル・解析条件

解析に用いる地盤モデルは地盤条件により決定され、いろいろな地盤条件を網羅できるよう多種多様であることが望ましい。そこで、「道路橋示方書・耐震設計編」²⁰⁾を参考にして解析に用いる地盤モデルの選定を行った。道路橋示方書で分類されているI種地盤、II種地盤、III種地盤の中から各々一つの実例をピックアップしモデル化を行った。このI種、II種、III種は地盤特性値 T_G により区別されている。解析に用いた地盤の材料特性値を表-4に示す。

タンクのモデルとしては、内径90m、高さ22.1m壁厚0.9m、底版厚1.8mの大型のタンクを想定している。解析モデルの有限要素メッシュの一例（I種地盤）を図-23に示す。なお、タンクの材料特性値については前例と同じものを用いた。軸対称有限要素法では、杭基礎を表現するために同心円上に杭と地盤とが交互に存在する状態を等価な弾性定数で置き換える必要がある。杭は一般には地盤条件、構造物等によって定まるものであるが、本研究では簡易的な方法として数例のタンク的设计例より、タンクの重量に対する杭の平均的な断面積を求め、解析に用いるタンクの重量の応じて杭の断面積を決定した。杭と地盤とを合成させた等価な弾性定数 E は

$$E = \frac{E_p A_p + E_g A_g}{A_p + A_g} \quad (34)$$

として求めている。ただし、 E, A はそれぞれ弾性係

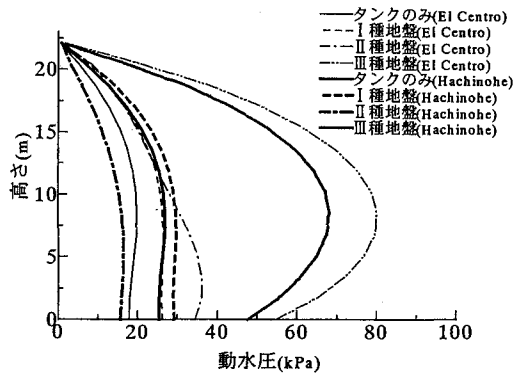


図-24 地盤の違いによる動水圧分布

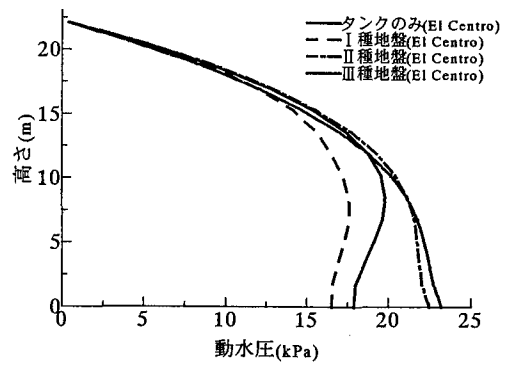


図-27 杭基礎の場合の動水圧分布

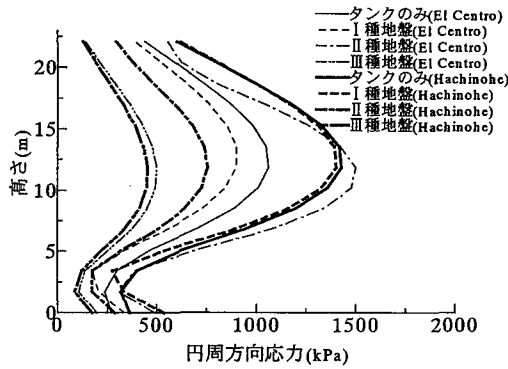


図-25 地盤の違いによる円周方向応力分布

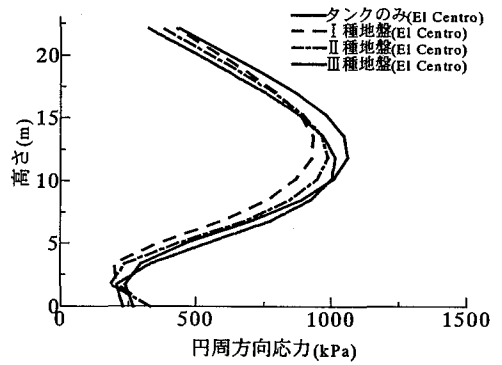


図-28 杭基礎の場合の円周方向応力分布

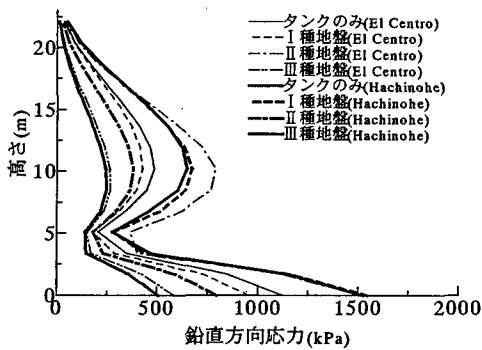


図-26 地盤の違いによる鉛直応力分布

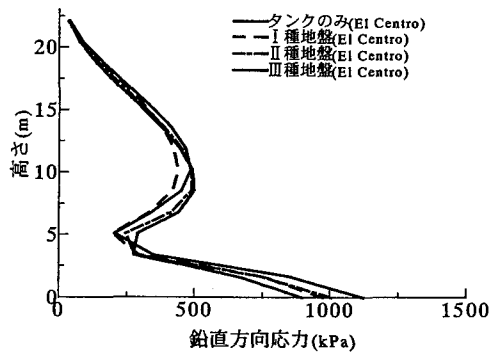


図-29 杭基礎の場合の鉛直方向応力分布

数、断面積を表し、添字 p, g はそれぞれ杭、地盤を表す。

b) 解析結果

図-24は地盤の違いによる動水圧分布を示したものである。タンクのみ場合にはEl Centro波、Hachinohe波の最大加速度を100galに修正したものをタンク底版に入かし、地盤を含めた解析では地表面加速度が100galとなるようにDeconvolutionによって

基礎での加速度を決定した。El Centro波入力時の動水圧分布は、一般的には地盤が柔らかくなるに従い動水圧は大きくなる傾向があり、特にⅢ種地盤についてはタンクのみの場合に比較して約4倍の動水圧が働いている。これは地盤が柔らかくなるにつれてタンクの揺れ自体が大きくなることが原因と考えられる。Hachinohe波入力時の動水圧分布は、タンクのみとⅠ種地盤の動水圧はあまり差がない。地盤の違いによる円周方向応力分布を図-25に示す。応力は

タンクの中央部付近で最大となっている。動水圧分布ではⅢ種地盤が一番大きな値となったが、円周方向応力は、Ⅲ種地盤がかえって小さな値となっている。これは支持地盤が柔らかいため、地盤の変形によりタンク自体の変形が小さいためと考えられる。図-26には鉛直方向応力の分布を示す。タンク中央部ではタンク側壁自体の曲げ変形により曲げ応力が働き、タンク下端部では側壁が底版に固定されていることにより生じる曲げモーメントの影響により曲げ応力が働いている。図-27, 28, 29にはタンクが杭基礎で支持えられている場合の動水圧分布、円周方向応力、鉛直方向応力を示す。タンクが杭で支持されている場合には地盤の影響はあまり受けない。

4. 結論

本研究は、地震時におけるコンクリート製液体貯蔵タンクの挙動をできるだけ正確に把握することを目的にタンクと地盤との相互作用、タンクと内容液との相互作用を考慮に入れた解析を行ったものである。以下に本解析で得られた結論を要約する。

(1) 速度ポテンシャル理論と粘性境界を用いた有限要素解析によりタンク壁の変形や地盤の影響を考慮に入れた解析が可能となった。

(2) 液体要素のメッシュ分割は、高さ方向を細かく分割していれば良く、幅方向はある程度長くしても解析精度には、あまり影響を与えない。本解析例では、高さ方向のメッシュサイズを1m程度に分割していれば、十分な精度で解析が行える。

(3) 従来のタンク壁が剛と仮定した慣用計算法では本解析法のような変形圧の影響を考慮することができない。その結果、タンク中央部で動水圧を小さく見積もる傾向がある。特に大型のタンクではその傾向が顕著に現れる。

(4) 地震時動水圧に及ぼす変形圧の影響は大きく、タンクが大型になる（内径が大きくなる）ほどその傾向は大きくなる。

(5) 地震時にタンク壁面に生じる円周および鉛直方向応力は、タンク壁に作用している動水圧の影響が大きい。一般に基礎地盤の剛性が小さくなるにつれてタンク壁に作用する動水圧は大きくなる。

(6) タンク壁面に生じる応力は地盤や基礎の影響を大きく受ける。地盤によっては変位が大きくても発生する応力は小さい場合もあり、地盤を含めた解析の必要性を示唆している。

付 録

部分積分公式

$$\int_V A \left(\frac{1}{r} \frac{\partial B}{\partial r} + \frac{\partial^2 B}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} \right) dv + \int_V \left(\frac{\partial A}{\partial r} \frac{\partial B}{\partial r} + \frac{\partial A}{\partial z} \frac{\partial B}{\partial z} \right) dv = \int_S A \frac{\partial B}{\partial n} ds \quad (\text{付-1})$$

側方粘性境界マトリクス $[C_s]$ の誘導

要素の側面でなされる仮想仕事から定まった節点力ベクトルと節点速度ベクトルの関係は次式で与えられる。

$$\{f_s\} = \pi\rho \int_{-1}^1 [N]^T [N] r |J| d\xi [V_r] \{\dot{u}\} \quad (\text{付-2})$$

$$\text{ここで、} \{f_s\} = \{f_j^r, f_j^\theta, f_j^z, f_{j+1}^r, f_{j+1}^\theta, f_{j+1}^z\}^T \quad (\text{付-3})$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 \end{bmatrix} \quad (\text{付-4})$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & V_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & V_s \end{bmatrix} \quad (\text{付-5})$$

$$\{\dot{u}\} = \{\dot{u}_j, \dot{v}_j, \dot{w}_j, \dot{u}_{j+1}, \dot{v}_{j+1}, \dot{w}_{j+1}\}^T \quad (\text{付-6})$$

ただし、 V_p ：縦波速度、 V_s ：横波速度

これより要素の $j \sim j+1$ に対する粘性境界マトリクス $[C_s]^e$ は次式で与えられる。

$$[C_s]^e = \pi\rho \int_{-1}^1 [N]^T [N] r |J| d\xi [V_r] \quad (\text{付-7})$$

従って、側方粘性境界マトリクス $[C_s]$ は式(付-7)で与えられるマトリクスを側方境界全域にわたって加えあわせれば求まる。

底面粘性境界マトリクス $[C_b]$ の誘導

この場合は積分領域が異なるのみで考え方は側面粘性境界マトリクスの場合と全く同じである。

$$[C_b]^e = \pi\rho \int_{-1}^1 [N]^T [N] r |J| d\xi [V_b] \quad (\text{付-8})$$

$$\text{ここで, } [V_b] = \begin{bmatrix} V_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & V_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & V_r \end{bmatrix} \quad (\text{付-9})$$

自由地盤の変位に伴う側方境界剛性マトリクス $[G_s]$ の誘導

自由地盤の運動によってなされる仮想仕事は、解析領域と自由地盤を連続と考えて両者間の境界位置における応力を求め、これにこの位置における仮想変位を掛けることによって求まる。

$$\{f\} = \pi \int_{-1}^1 [B]^T [N] r |J| d\xi [D] \{u\} \quad (\text{付-10})$$

$$\text{ここで, } [D] = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (\text{付-11})$$

$$[B]^* = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & B_2 & 0 & 0 \\ 0 & B_1 & 0 & 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_1 & 0 & 0 & B_2 \end{bmatrix} \left(B_i = \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \right) \quad (\text{付-12})$$

すなわち、

$$[G_s]^e = \pi \int_{-1}^1 [B]^T [N]^* r |J| d\xi [D] \quad (\text{付-13})$$

側方境界剛性マトリクス $[G_s]$ は $[G_s]^e$ を側方境界面を構成する全節点にわたって加え合わせることによって求まる。

自由地盤の変形に伴う側方境界減衰マトリクス $[G_{cs}]$ の誘導

側方境界減衰マトリクスを $[G_{cs}]$ とすると、これはレイリー減衰の一種である剛性比例型を仮定して次式で与えれば十分な精度が得られる。

$$[G_{cs}]^e = \frac{h}{\pi f} [G_s]^e \quad (\text{付-14})$$

参考文献

1) 吉岡民夫, 大谷悟司, 高西昭彦: P Cタンクの地震時応力の近似計算法, 構造工学論文集, Vol.37A,

pp.1297-1307, 1991.8.

- 2) 吉岡民夫, 大谷悟司, 高西昭彦: 逆対称荷重を受ける直接基礎P Cタンク底面の断面力計算法, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1211-1220, 1992.3.
- 3) 吉岡民夫, 大谷悟司, 高西昭彦: 逆対称荷重が作用するP Cタンク側壁の断面力計算法, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.113-122, 1994.11.
- 4) Housner, G.W.: Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.48, No.1, pp.15-35, 1957.1.
- 5) 山本鎮男, 清水信行: 地震波の長周期成分が長周期構造物に及ぼす影響, 日本機械学会講演集, No.740-3, 1974.4.
- 6) 曾我部潔, 重田達也, 柴田 碧: 液体貯槽の耐震設計に関する基礎的研究, 東京大学生産技術研究所報告, Vol.26, No.7, pp.261-290, 1977.3.
- 7) 藤田勝久: 液体貯蔵円筒タンクの耐震解析に関する研究, 三菱重工技報, Vol.21, No.2, pp.319-328, 1984.3.
- 8) Stiess, U.W.: *Proc. ASCE, J.Eng. Mech. Div.*, EM4, pp.679, 1981.
- 9) 藤田勝久: 自由液面振動を考慮した液体貯蔵円筒タンクの地震応答解析, 日本機械学会論文集C編, Vol.47, No.413, pp.20-29, 1981.1.
- 10) 藤田勝久: 自由液面振動を考慮した液体貯蔵円筒タンクの地震応答解析(続報, エネルギー法による取扱), 日本機械学会論文集C編, Vol.47, No.422, pp.1296-1308, 1981.10.
- 11) 清水信之, 山本鎮男, 河野和間: 円筒タンクの耐震設計に関する研究(第1報, 有限要素法による剛基礎上の円筒タンクの基礎理論), 日本機械学会論文集C編, Vol.48, No.426, pp.215-228, 1982.2.
- 12) 清水信之, 山本鎮男, 河野和間: 円筒タンクの耐震設計法に関する研究(第2報, 水平動に対する剛基礎上の円筒タンクの耐震計算法), 日本機械学会論文集C編, Vol.48, No.427, pp.328-348, 1982.3.
- 13) 坂井藤一, 迫田治行: 大型液体タンクの地震応答に関する研究, 第4回日本地震工学シンポジウム論文集, 1977.11.
- 14) 岡田統夫, 坂井藤一, 迫田治行: 有限要素法による大型液体タンクの地震応答解析, 川崎重工業技報, 59号, pp.69-74, 1975.12.
- 15) 岡田統夫, 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), 川崎重工業技報, 61号, pp.120-125, 1976.8.
- 16) Shaaban, S.H. and Nash, W.A.: Finite element analysis of a seismically excited cylindrical storage tanks, ground supported, and partially filled with liquid, *Report NSF/RA-760261*, University of Massachusetts, 1976.
- 17) 竹宮宏和: 地盤-基礎-上部構造物系の地震応答解析-動的サブストラクチャー法の適用-, 土と基礎, 29-9, pp.27-34, 1981.9.
- 18) Takemiya, H.: Three-Dimensional Seismic Analysis for Soil Foundation-Superstructure based on Dynamic Substructure Method, 土木学会論文集, No.356/I-3, pp.163-173, 1985.4.
- 19) 竹宮宏和, 魚谷広太郎, 福井 智: 部分モードの総合法による地盤-基礎-上部構造物系の三次元地震応答解析, 土木学会論文集, No.374/I-6, pp.531-539, 1986.10.

- 20) 幕田 宏, 馬場金司, 藤田勝久, 阿比留久徳, 菊池愛子: 液及び基礎地盤との連成を考慮した貯槽の耐震解析プログラム, 三菱重工技報, Vol.21, No.2, pp.310-318, 1984.3.
- 21) 後藤洋三, 白砂 健, 河村秀紀, 徳永正博: 液体~構造物~地盤連成系の地震応答解析手法について, 大林組技術研究所報, No.27, pp.54-58, 1983.
- 22) 三浦房紀, 浜田純夫, 森川慎吾: 非軸対称荷重を受ける地盤~構造系における粘性境界, 山口大学工学部研究報告, pp.67-76, 1986.
- 23) Lamb, H.: *Hydrodynamics*, 6th ed., Cambridge Univ. Press., 1932.
- 24) 日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説, 1979.
- 25) 日本水道協会: 水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書, 1980.3.
- 26) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1990.
- 27) 藤田勝久, 伊藤智博, 梶井紳一郎, 馬場金司, 田下昌紀: 高速増殖炉容器用三次元流体~構造物連成振動解析コードの開発, 三菱重工業技報, Vol.26, No.1, pp.45-50, 1989.1.
- 28) 塩尻弘雄: 水と岩盤との相互作用を考慮した構造物の地震応答解析法の研究, 電力中央研究所報告, No.U03, 1987.
- 29) 上島照幸, 花田和史, 江刺靖行: 地盤~構造物連成系の3次元振動応答解析プログラムの開発と検証, 電力中央研究所報告, No.382009, 1982.

(1999.6.14 受付)

A STUDY ON THE EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF CONCRETE LIQUID STORAGE TANKS INCLUDING HYDRODYNAMIC AND FOUNDATION INTERACTION EFFECTS

Hideaki NAKAMURA, Shingo MORIKAWA, Toshihiko ASO
and Sumio HAMADA

In the aseismic design of liquid storage tanks an assumption that the tank wall is a rigid body has conventionally been made. However, since the size of liquid storage tanks becomes larger, the dynamic rigidity comparatively decreases and it is necessary to include deformations of the tank walls in the design of tanks. In this study, a numerical method was developed for Axi-Symmetric analysis of tank structures including hydrodynamic and foundation interaction effects. The finite element method was newly developed for the internal liquid based on the velocity potential theory. In order to absorb the radiation wave energy through the boundary, a viscous boundary has been employed. Validity and utility of the program are demonstrated by some test calculations including those for a tank made of concrete.