

流体と軸対称構造物との地震連成振動解析に関する研究

中 村 嶽 岡 田 宏

Study on Hydrodynamic Interaction Effect of Axisymmetric Structure-Water Systems Subjected to Earthquake Motions

Takashi Nakamura Hiroshi Okada

Abstract

Chopra et al. developed the finite element method for axisymmetric tower structures surrounded by water considering hydrodynamic interaction. The authors added various functions to this for general applicability. The principal ones among the additional functions are the capability of considering compressibility of fluids, influences of surface waves, and infinity of fluids such as seas. These functions made it possible for thin-shell elements to be added, multi-walled structures to be evaluated and analysis of diverse structural forms to be made. Also, along with improving the analytical method for calculative efficiency, time-history response analysis by direct integration has been made possible. In this paper, analyses are made of ① base-isolated tank, ② double-cylinder tank, and ③ offshore structure. The analytical results are compared with experimental and literature-search results, and a few points about the results are discussed. This advanced analytical method is proved to give accurate results and to be useful for various structure-water systems.

概 要

Chopra 等により開発された有限要素法による軸対称水中構造物の連成振動解析法に、各種機能を追加して汎用性を持たせた。主な追加機能は、流体の圧縮性や表面波の影響および海洋などの流体の無限性の考慮ができること、薄肉シェル要素の追加および多重壁構造の評価ができることにより、多様な構造形式の解析が可能となっている。また、演算効率の向上をはかると共に、直接積分法による時刻歴応答解析を可能とした。本報告は、① 免震タンク、② 二重円筒タンクおよび③ 海洋構造物について解析を行なって、実験データおよび文献の実験値や解析値との照合によって本解析法の妥当性を検証した結果と、流体関連構造物の基本振動特性を評価・検討した結果を示す。解析結果は、実験および文献の結果とよく対応しており、本解析法は多様な形式の流体関連構造物の地震連成振動解析に適用できることが確認された。

1. はじめに

流体と構造物の地震連成振動解析に関する解析手法としては、Chopra 等により開発された有限要素法による軸対称水中構造物連成振動解析プログラムがある¹⁾。その特徴は、①流体は非圧縮・非粘性・非回転の理想流体を仮定し、流体の自由表面の波動は無いものとしている。②構造物は、流体の圧縮性が無視できる細長い塔状の取水塔を対象とし、厚肉シェル要素でモデル化をしている。また構造物内の流体は固定水としてモデル化をしている。③構造物に作用する流体力は付加質量の考え方で定式化をしている。④時刻歴解析はモーダル応答法の手法を採用しているなどであり、当社で実施した固定式海洋構造物の振動実験の地震応答解析に用いた例がある²⁾。この解析手法では、タンクなどに見られる内部流体の自

由表面の動揺（スロッシング）および構造-流体連成振動（バルジング）の評価ができず、水中構造物の地震応答時に外部流体の自由表面に生じる波の影響の評価ができない。また、流体は非圧縮性を仮定しているが、流体の圧縮性が構造-流体連成振動に及ぼす影響を評価するには、圧縮性流体の運動方程式の定式化と構造-流体連成方程式の定式化が必要となる。

本報告で示す解析法は、上記の解析手法の問題点に対応し、圧縮性と自由表面の波動を考慮した流体および軸対称構造物の各運動方程式の定式化と、これらの連成運動方程式の誘導を骨子とする。さらに解析法の妥当性を検証するために、①免震タンク、②二重円筒タンクおよび③海洋構造物を対象とする解析を行ない、既往実験結果および文献資料との照合を行なった結果を示す。

2. 解析理論の趣旨

基本解析式の定式化に際し、①流体については圧縮性、自由表面の波高、海洋立地を想定した場合の流体の無限の広がり进行评估し、②構造物については形状の多様化対応を想定して、薄肉シェル要素および多重構造形式の評価手法の導入をはかった。解析・演算上の便宜性の見地からは、③流体と構造物の連成運動方程式の非対称マトリックスのMüllerの手法による対称化、④時刻歴応答解析でのモーダル法と直接積分法の両手法の併用を試みた。以上の趣旨に基づく、圧縮性と自由表面の波を考慮した流体の運動方程式と構造物の運動方程式の定式化と、構造-流体連成運動方程式の誘導について示す。

2.1 基礎式

図-1に構造-流体連成解析モデルを示す。流体は非粘性・非回転の圧縮性流体と仮定する。

流体の圧縮性と粘性減衰を考慮すれば、圧力 p は次式で示される。

$$\text{div}(\text{grad } p) = \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + k \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 c ；流体音速、 k ；粘性減衰係数である。

流体と構造との境界において適合条件は、

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_L n \ddot{u} \quad \dots\dots\dots(2)$$

で示される。ここに、 \ddot{u} ；構造加速度、 ρ_L ；流体密度、 n ；境界面での外向き法線ベクトルである。

重力場における流体の自由表面境界 Γ_F は、微小振幅を仮定することにより、次式で示される。

$$p = \rho_L g \eta \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 g ；重力加速度、 η ；自由表面鉛直方向変位である。また(2)式より

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_L \ddot{u}_z \quad \dots\dots\dots(4)$$

あるいは、自由表面変位 η と流体圧力 p の関係を用いて、次式の関係を得る。

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{1}{g} \ddot{p} \quad \dots\dots\dots(5)$$

流体領域 Ω_L 内の圧力 p 、構造領域 Ω_S の変位 u および自由表面境界 Γ_F の液面変位 η を次式で仮定する。

$$p = \sum N^L_i p_i, \quad u = \sum N^S_i u_i, \quad \eta = \sum N^L_i \eta \quad \dots\dots\dots(6)$$

式(1)、(2)、(5)に式(6)の重み関数を用いて、Galerkin法により離散化して、次式の圧縮性を考慮した流体の運動方程式が得られる。

$$[G]\{\dot{p}\} + [L_F]\{\dot{p}\} + [H]\{p\} = \{f_p\} - [S]\{\dot{u}_s\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 $\{p\}$ ；流体要素節点圧力ベクトル、 $\{u_s\}$ ；構造要素節点変位ベクトル、 $\{f_p\}$ ；流体要素節点外圧ベクトル、

$$[G] = \frac{1}{c^2} \int_{\Omega_L} N^L_i N^L_j d\Omega + \frac{1}{g} \int_{\Gamma_F} N^L_i N^L_j d\Gamma$$

$$[L_F] = \frac{k}{c^2} \int_{\Omega_L} N^L_i N^L_j d\Omega$$

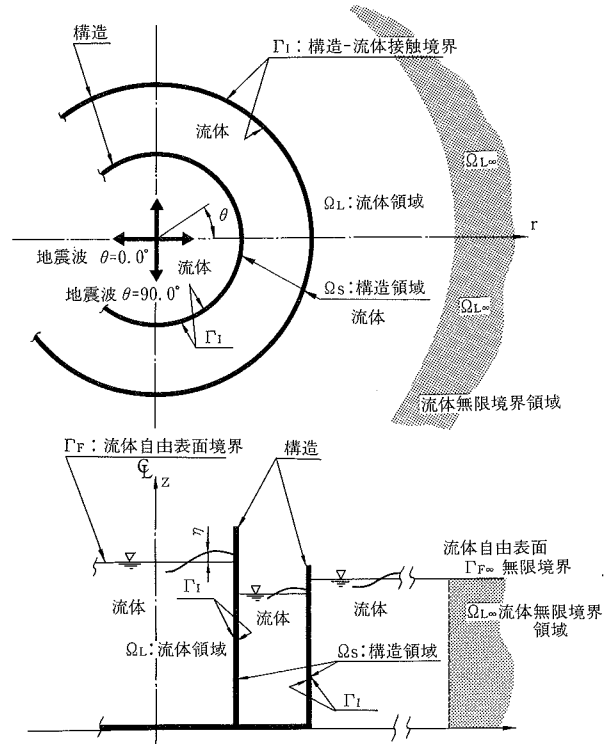


図-1 構造-流体連成解析モデル

$$[H] = \int_{\Omega_L} (\text{grad } N^L_i)^T (\text{grad } N^L_j) d\Omega$$

$$[S] = \int_{\Gamma_I} \rho_L N^L_i n N^S_j d\Gamma$$

構造の運動方程式は、(8)式のように表わされる。

$$\rho_S \frac{\partial^2 u_{Si}}{\partial t^2} = \sigma_{i,j} + \rho_S a_i \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 σ_{ij} ；応力テンソル、 ρ_S ；構造密度、 a_i ；外力加速度、 u_s ；構造変位を表わす。

構造面と流体の境界 Γ_I では、流体圧力と構造の表面応力が一致し、かつ粘性係数を0として次式を得る。

$$\sigma_i = -p \delta_{ij} n_j \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 δ_{ij} ；クロネッカーのデルタを表わす。

(8)式および(9)式に構造変位の重み関数 N^S を乗じ Galerkin法を用いて、減衰を考慮した構造の運動方程式として次式を得る。

$$[M_S]\{\ddot{u}_s\} + [C_S]\{\dot{u}_s\} + [K_S]\{u_s\} = \frac{1}{\rho_L} [S]^T \{p\} + \{f_s\} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $[M_S]$ ；構造質量マトリックス、 $[C_S]$ ；構造の減衰マトリックス、 $[K_S]$ ；構造剛性マトリックス、 $[S]$ ；構造-流体境界マトリックス、 $\{f_s\}$ ；荷重ベクトル、 $\{p\}$ ；流体圧力ベクトル、 $\{u_s\}$ ；構造変位ベクトルを表わす。

$$[M_S] = \int_{\Omega_S} \rho_S N^S_i N^S_j d\Omega$$

$$[K_S]\{u_s\} = \int_{\Omega_S} N^S_{i,j} \sigma_{ij} d\Omega$$

$$-\frac{1}{\rho_L} [S]^T = \int_{\Gamma_I} N^S_i N^L_j d\Gamma$$

$$\{f_s\} = \int N^s \rho_s a_1 d\Omega$$

2.2 構造-流体連成方程式

流体の圧縮性を考慮した場合の構造-流体連成方程式は、構造の変位と流体の圧力を未知数として以下のように得られる。

(10)式および(7)式を連立し、マトリックスの形で示すと次式となる。

$$\begin{bmatrix} [M_s] & 0 \\ [S] & [G] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & 0 \\ 0 & [L_P] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & -[S]^T/\rho_L \\ 0 & [H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_s \\ f_p \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(11)$$

地震動を対象とした場合(11)式は次のように示される。

$$\begin{bmatrix} [M_s] & 0 \\ [S] & [G] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & 0 \\ 0 & [L_P] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & -[S]^T/\rho_L \\ 0 & [H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ p \end{Bmatrix} = -\ddot{u}_c \begin{bmatrix} [M_s] & 0 \\ [S] & [G] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_s \\ d_p \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(12)$$

ここに、 \ddot{u}_c :地震加速度、 $\{d_s\}$:構造荷重方向ベクトル、 $\{d_p\}$:流体荷重方向ベクトル(=0)を表わす。

(12)式において減衰マトリックスをレーリー減衰等で表わし、Müllerの用いた手法³⁾により対称化を行なうと次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} [M_s] + [S]^T[H]^{-1}[S]/\rho_L & [S]^T[H]^{-1}[G]/\rho_L \\ [G]^T[H]^{-1}[S]/\rho_L & [G]^T[H]^{-1}[G]/\rho_L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & 0 \\ 0 & [L_P] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & 0 \\ 0 & [G]^T/\rho_L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ p \end{Bmatrix} = -\ddot{u}_c \begin{bmatrix} [M_s] + [S]^T[H]^{-1}[S]/\rho_L \\ [G]^T[H]^{-1}[S]/\rho_L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_s \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(13)$$

また、固有振動方程式は、固有値を ω 、構造変位モード形状ベクトルを $\{\phi_s\}$ 、流体圧力モード形状ベクトルを $\{\phi_p\}$ とすれば、

$$\begin{bmatrix} [K_s] & 0 \\ 0 & [G]^T/\rho_L \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} [M_s] + [S]^T[H]^{-1}[S]/\rho_L \\ [G]^T[H]^{-1}[S]/\rho_L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_s \\ \phi_p \end{Bmatrix} = \{0\} \quad \dots\dots(14)$$

と表わされる。

2.3 有限要素モデル

流体-構造連成問題の有限要素モデルは、以下のものを用いている。構造要素は4節点 SOLID 要素と2節点薄肉 SHELL 要素がある。流体要素は構造要素と同じ4節点 SOLID 要素の有限領域要素と自由表面を定義する自由表面要素があり、流体の無限境界要素は、6節点領域要素と3節点自由表面要素があり無限遠での圧力を拘

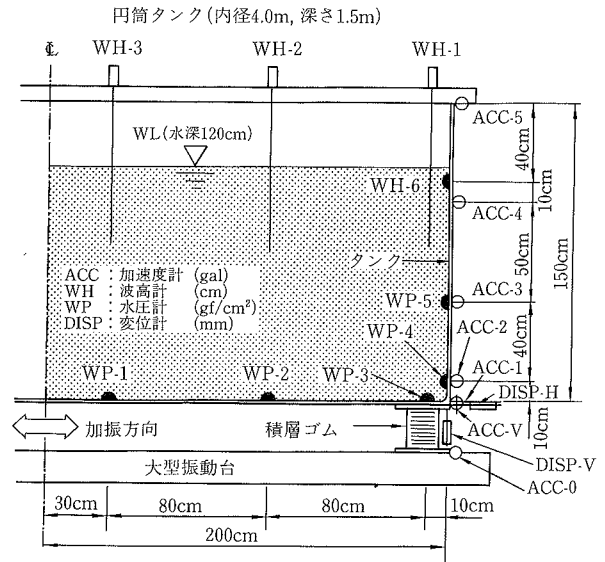


図-2 免震タンク試験体および測点

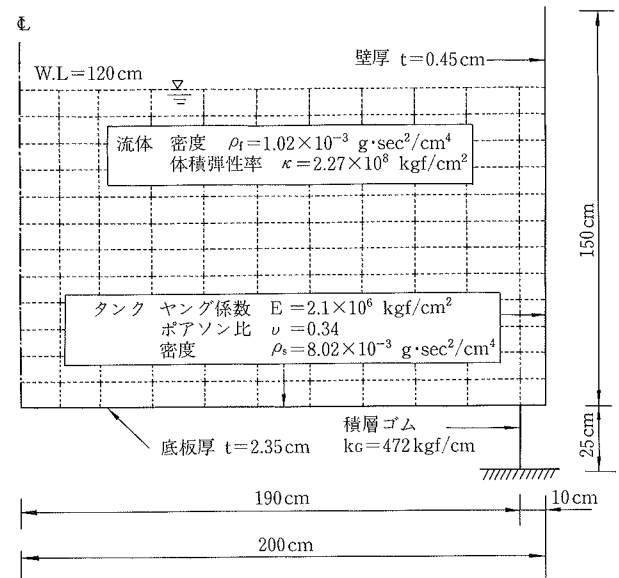


図-3 免震タンクのFEM解析モデル

束している⁶⁾。また流体と構造の接触面を定義する構造-流体境界要素を用いる。

3. 構造-流体連成系モデルの解析

3.1 免震タンクの振動特性

従来の地盤や構造物で支持された通常の円筒タンクのスロッシングや内部貯液との連成に関しては種々の実験および解析による検討⁴⁾が行なわれているが、タンクへの免震適用に関する研究は少ない。構造-流体連成系モデルの一例として、タンクを積層ゴムで支持した免震タンクの検討を行なった。

3.1.1 免震タンク試験体 図-2に試験体の概要と測点を示す。使用したタンクは直径4.0m、高さ1.5m、壁厚4.5mm、自重2.98tfの比較的剛な鋼製円筒タンク

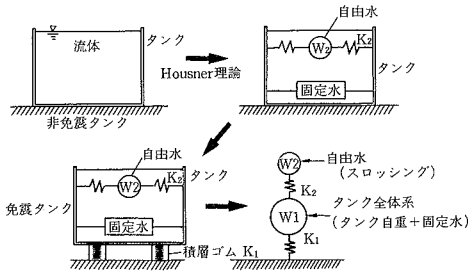


図-4 Housner 理論による振動モデル

表-1 鋼製タンクの固有振動数

水深 (cm)	非免震(固定)タンク			免震タンク					
	スロッシング1次			スロッシング1次			タンク全体系1次		
	Housner	FEM	実験値	Housner	FEM	実験値	Housner	FEM	実験値
0	—	—	—	—	—	—	1.98Hz	1.980Hz	1.98Hz
30	0.248Hz	0.248Hz	0.244Hz	0.248Hz	0.244Hz	0.244Hz	1.51Hz	1.921Hz	1.93Hz
60	0.339Hz	0.339Hz	0.342Hz	0.337Hz	0.328Hz	0.342Hz	1.30Hz	1.733Hz	1.73Hz
90	0.394Hz	0.394Hz	—	0.386Hz	0.374Hz	—	1.20Hz	1.514Hz	—
120	0.427Hz	0.428Hz	0.439Hz	0.409Hz	0.398Hz	0.391Hz	1.17Hz	1.316Hz	1.27Hz
150	0.448Hz	0.449Hz	—	0.416Hz	0.409Hz	—	1.16Hz	1.149Hz	—

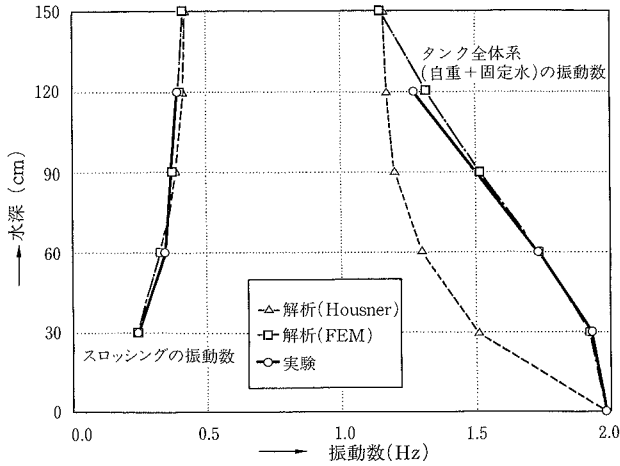


図-5 免震タンクの固有振動数

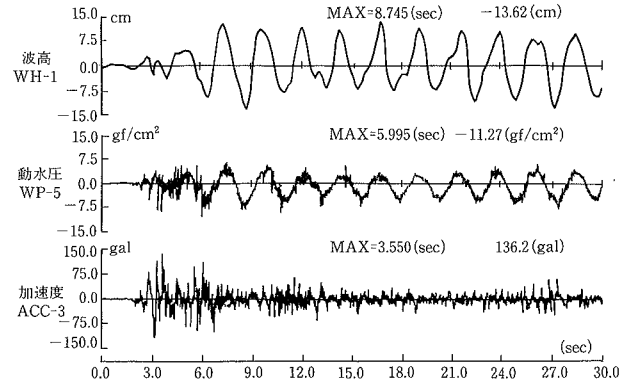


図-7 非免震タンクの実測波形 (EL-CENTRO NS 波 116 gal 入力)

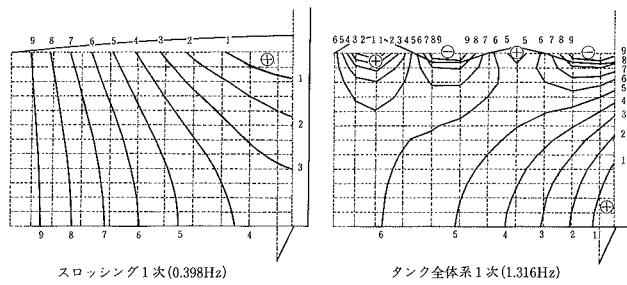


図-6 免震タンクの振動モード (FEM 解析)

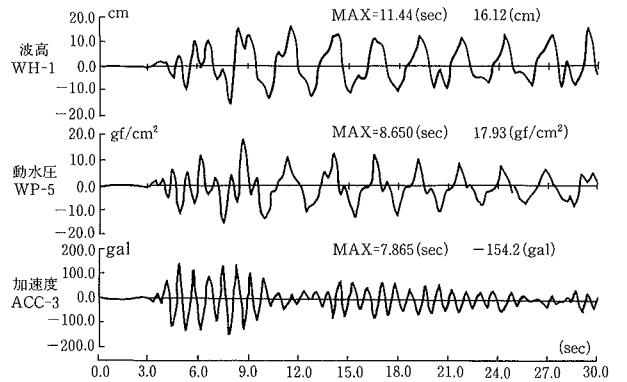


図-8 免震タンクの実測波形 (EL-CENTRO NS 波 106 gal 入力)

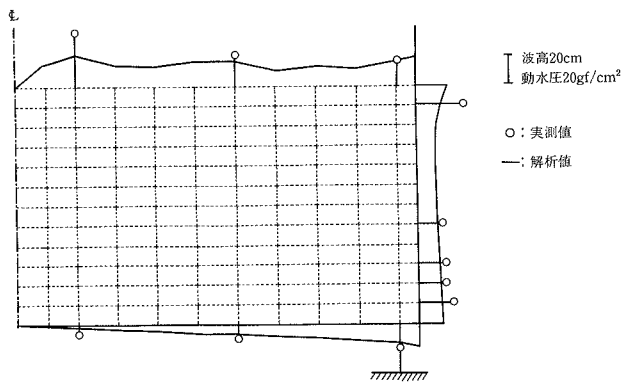


図-10 免震タンクの動水圧・波高の最大値分布 (EL-CENTRO NS 波 106 gal 入力)

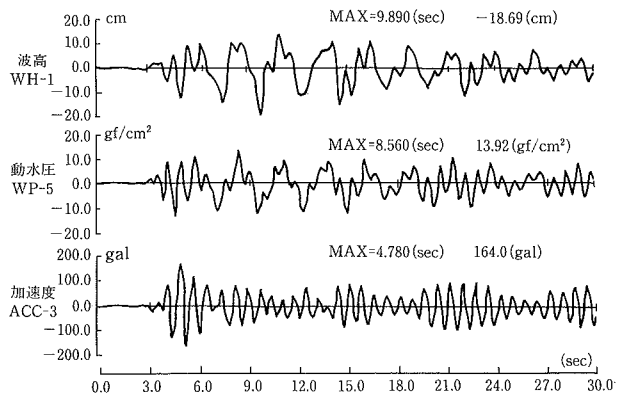


図-9 免震タンクの FEM 解析波形 (EL-CENTRO NS 波 106 gal 入力)

である。タンクの支持条件は固定（非免震）と6個の積層ゴムで支持した場合（免震）があり、水深を0 cm, 30 cm, 60 cm, 120 cm と変化させて地震波を入力した。積層ゴムは高さ約24 cm, 直径約15 cm の寸法で、その水平剛性は約80 kgf/cm である。

3.1.2 実験および解析結果

(1) 固有値 図-3 に解析モデルを示す。構造体は SHELL 要素モデルを用い、流体は圧縮性流体とし、通常の水の体積弾性率 $\kappa = 2.27 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$ を用いた。また図-4 に Housner 理論による自由水, 固定水とタンク自重の和および積層ゴムの水平剛性よりスロッシングおよびタンク全体系の振動数を算出する方法を示す。表-1 および図-5 に実験および解析による水深をパラメータにしたタンクのスロッシング1次およびタンク全体系1次の固有振動数を示す。スロッシング1次の固有振動数は実験値, 本解析値, Housner 理論値とも良い対応を示しており、免震タンクのスロッシング1次の周期は、非免震タンクに比べてより長周期となる傾向が見られる。タンク全体系1次の固有振動数は、本解析値が実験値と良く対応するのに対し、Housner 理論値は水深が浅い30 cm および60 cm の場合には、実験値よりもやや低い振動数となっている。図-6 に免震タンクの水深120 cm のときの本解析によるスロッシング1次とタンク全体系1次の振動モードを示す。

(2) 地震応答 水深120 cm の非免震タンクおよび免震タンクの地震波入力実験を行なった。図-7 に非免震タンクの、図-8 に免震タンクの EL-CENTRO NS 波約100 gal 入力の代表的な測点の加速度, 動水圧および波高の実測波形を示す。非免震タンクの加速度および動水圧においては約11 Hz の高い振動数成分（バルジング）が卓越するのに対し、免震タンクにおいては約0.4 Hz のスロッシング1次と約1.3 Hz の免震はタンク全体系1次の振動数成分が卓越し、高い振動数成分は極端に低減されている。

図-9 に、水深120 cm の免震タンクの EL-CENTRO NS 波106 gal 入力の加速度, 動水圧および波高の解析波形を示す。解析においては、減衰は一律1%の等価モード減衰を仮定し、時刻歴解析は直接積分法を用いた。また、図-10 に実測および解析による動水圧と波高の最大値分布を示す。図-8 に示す加速度, 動水圧および波高の実測波形と、図-9 に示す各解析波形は、ほぼ対応している。また、図-10 に示す動水圧と波高の最大値分布においても、実験と解析とはほぼ対応している。

3.2 二重円筒タンクの振動特性

構造-流体連成系モデルの固有値解析の検証を二重円筒タンクのアニュラス部（外槽と内槽との間）に水を貯えたモデルのスロッシングおよびバルジングについて検討を行なった。

3.2.1 スロッシングの検討 写真-1 に二重円筒タンクの実験状況を示す。図-11 に二重円筒タンクの実験

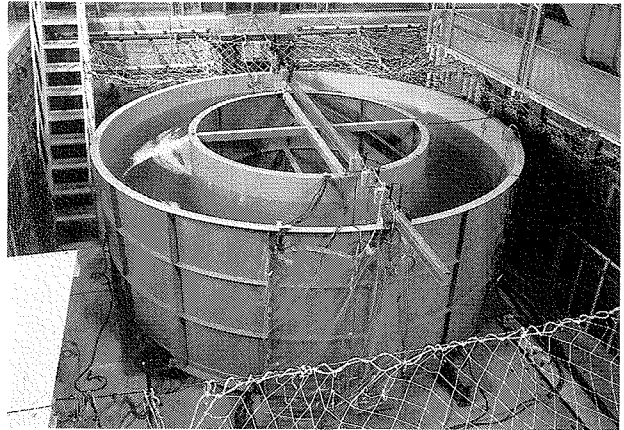
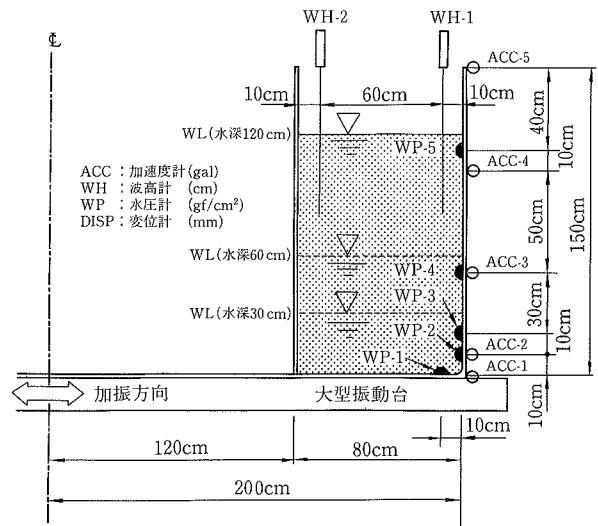


写真-1 二重円筒タンクの振動台実験



二重円筒タンク（外槽4.0m、内槽2.4m、深さ1.5m）

図-11 二重円筒タンクのスロッシング実験モデル

表-2 鋼製二重タンクのスロッシングの固有振動数

水深	30cm		60cm		120cm	
	実験値	FEM	実験値	FEM	実験値	FEM
1	0.171Hz	0.171Hz	0.241Hz	0.238Hz	0.316Hz	0.317Hz
2	0.912Hz	0.922Hz	0.990Hz	0.998Hz	0.994Hz	1.005Hz
3	1.39 Hz	1.428Hz	1.39 Hz	1.437Hz	1.40 Hz	1.437Hz
4	—	1.816Hz	—	1.816Hz	—	1.816Hz
5	—	2.194Hz	—	2.194Hz	—	2.194Hz

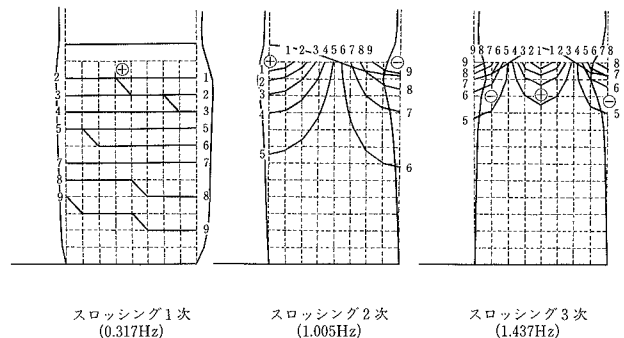


図-12 二重円筒タンクのスロッシング振動モード

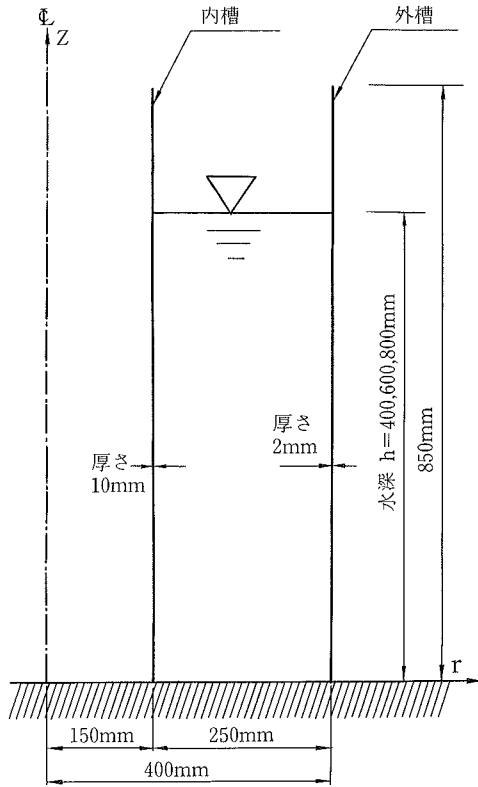


図-13 二重円筒タンクのパルジング実験モデル

モデルを示す。タンクは免震タンクと同じ直径 4.0 m の鋼製タンクの内側に直径 2.4 m の鋼製の内槽を設置し、アニュラス部の水深をパラメータに振動台による正弦波入力実験を行なった。

解析における二重円筒タンクと流体の各物性値は、図-3 に示す同じ数値を用いている。

表-2 に、水深が 30 cm, 60 cm および 120 cm の実験および解析によるスロッシングの固有振動数を示す。実験と解析値は良い対応を示している。水深のスロッシングの周期に及ぼす影響は、高次（4 次以上）の周期に変化は見られないが、水深が浅いほど低次のスロッシングの周期は長くなる。図-12 に解析による水深が 120 cm のときの 1～3 次のスロッシングの固有モードを示す。

3.2.2 パルジングの検討 文献⁵⁾の二重円筒タンクのパルジングの実験値と、本解析による結果の比較を行なった。図-13 に二重円筒タンクのパルジングの実験モデルを示す。解析の FEM の構造モデルは、SOLID 要素モデルおよび SHELL 要素モデルを用い、構造材料はアクリルで、物性値はヤング率 $E=3.674 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$ 、質量密度 $\rho=1.382 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu=0.341$ を用いた。

表-3 に、水深が 40 cm, 60 cm および 80 cm の実験および解析によるパルジング 1 次の固有振動数を示す。実験と解析値は良い対応を示している。解析においては、

表-3 二重タンクのパルジング 1 次の固有振動数

水深	文献実験値 ⁵⁾	FEM	
		SHELL要素	SOLID要素
80cm	24.3Hz	24.24Hz	24.70Hz
60cm	35.3Hz	33.69Hz	34.73Hz
40cm	54.4Hz	50.59Hz	53.99Hz

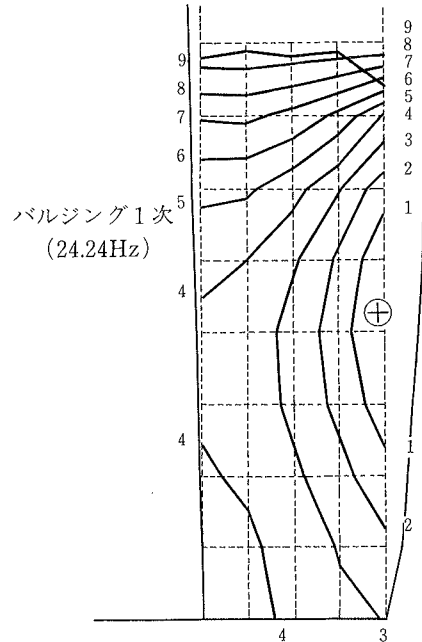


図-14 二重円筒タンクのパルジング 1 次振動モード (FEM 解析 SHELL 要素)

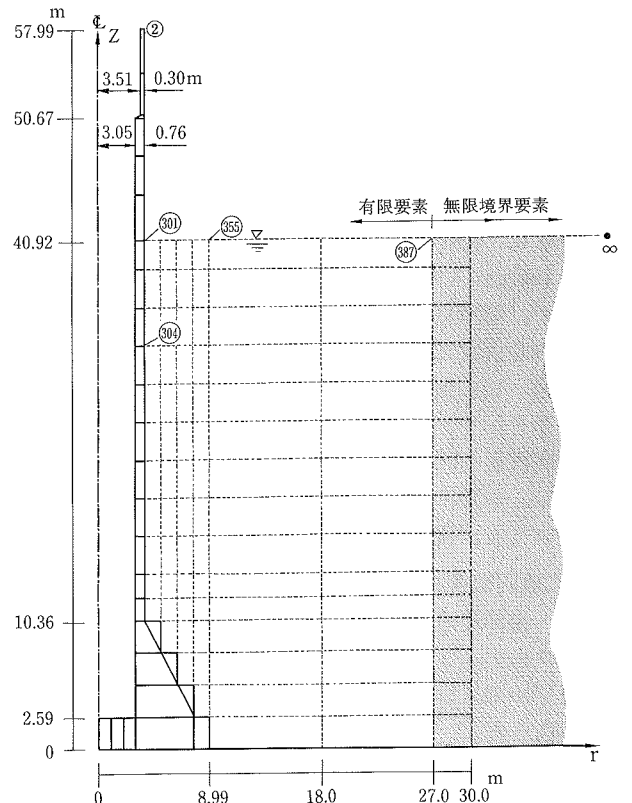


図-15 海洋構造物の FEM 解析モデル

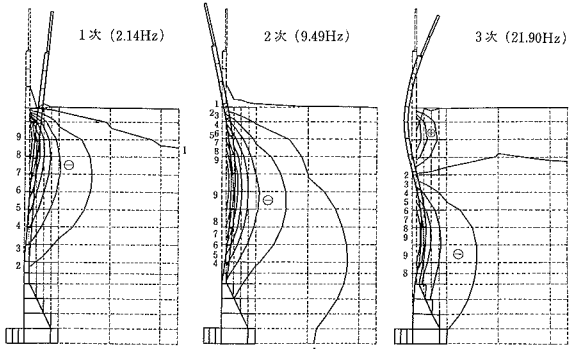


図-16 海洋構造物の振動モード (FEM 解析)

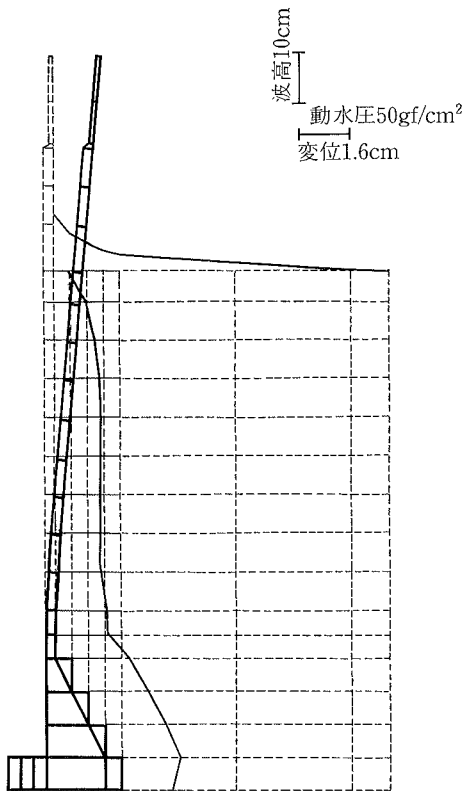


図-18 地震応答解析波形
(TAFT EW 波 176 gal 入力)

SOLID 要素モデルの構造モデルは、SHELL 要素モデルより少し高め固有振動数となり、より実験値に近い値となっている。図-14に SHELL 要素モデルを用いた解析による水深が 80 cm のときのバルジング 1 次の振動モードを示す。

3.3 海洋構造物の地震応答解析の検討

文献¹⁾の水中構造物モデルを解析例として、固有値解析および地震応答解析を行なった。解析モデルを図-15に示す。構造物の外部の流体の影響を評価するために、構造物内部には流体は無い空の状態を仮定している。構造物材料は鉄筋コンクリートを想定して、構造モデルは SOLID 要素モデルを用い、材料物性値としてヤング率

表-4 海洋構造物と流体との連成固有振動数

次数	文献値 ¹⁾	FEM	
	非圧縮性流体波の影響無視	非圧縮性流体波の影響考慮	圧縮性流体波の影響考慮
1	2.21Hz	2.14Hz	2.14Hz
2	9.65Hz	9.49Hz	9.12Hz
3	22.58Hz	21.90Hz	21.64Hz

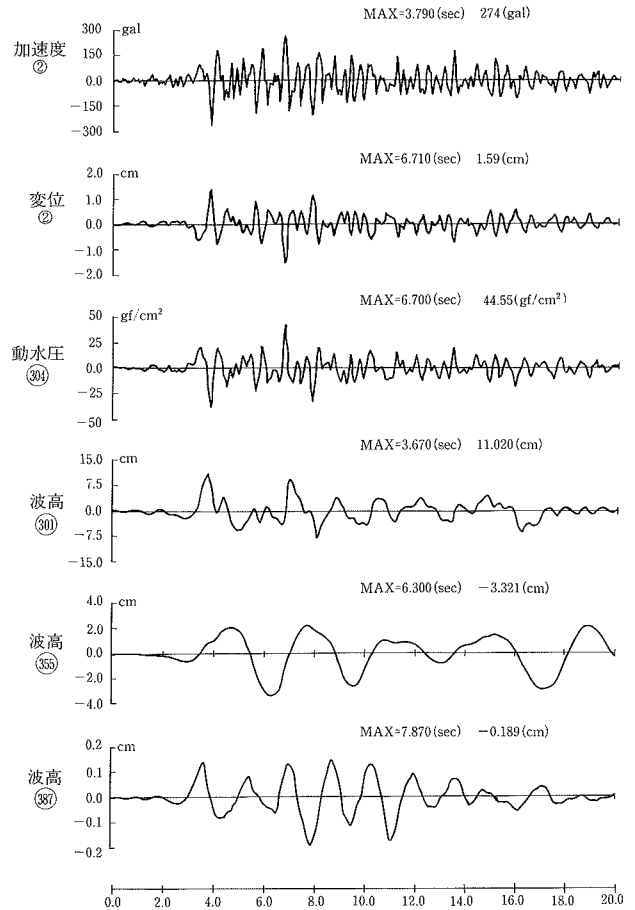


図-17 地震応答解析最大値分布
(TAFT EW 波 176 gal 入力)

$E=3.17 \times 10^9 \text{ kgf/m}^2$ 、質量密度 $\rho=235 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$ 、ポアソン比 $\nu=0.17$ を用いた。また流体は水を想定し、流体密度は $\rho_L=102 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$ を用いた。

3.3.1 固有値解析 表-4に、圧縮性流体および流体の体積弾性率を無限大にした非圧縮性流体について、流体の自由表面の波の影響は考慮し、無限境界要素⁶⁾が無い場合の流体-構造物連成の固有振動数を示す。なお、文献値¹⁾は流体を非圧縮性とし、かつ波の影響を無視した場合の流体-構造物連成の固有振動数であり、本解析値に比べてやや高い振動数となっている。流体の圧縮性の影響については、1次の流体-構造物連成の固有振動数には変化は見られないが、2次および3次の流体-構

造物連成の固有振動数は、非圧縮性流体に比べて、圧縮性流体の場合にはやや低くなっている。図-16に非圧縮性流体の場合の1～3次の流体-構造物連成の振動モードを示す。

3.3.2 地震応答解析 図-17に、レーリ減衰1%を仮定し、流体の圧縮性(体積弾性率 $\kappa = 2.27 \times 10^8$ kgf/m²)と自由表面の波の影響を考慮し、かつ流体の広がりを無限境界要素で評価した場合の、TAFT EW 波 176 gal 入力の直接積分法による地震応答解析の代表的な節点の加速度、変位、動水圧および波高の時刻歴波形を示す。また図-18に、そのときの最大値分布(構造変位、動水圧、波高)を示す。動水圧の分布は自由表面より深くなるにつれ増大し、ある深さよりほぼ一定の値となる。波高については、構造物の近傍では11 cm程度の波が生じるが、無限境界要素の効果により、構造物から離れるに従って波高が小さくなっており、本解析法により海洋構造物の地震応答をほぼ妥当に評価出来るのが分かる。

4. まとめ

圧縮性と自由表面の波動を考慮した流体-軸対称構造物・地震連成振動解析法の概要を説明し、さらに検証事例として、①免震タンク、②二重円筒タンクおよび③海洋構造物をとりあげ、解析検討を行なった。本解析結果は、筆者らの既往実験結果および文献資料の結果とよい対応を示しており、本解析法の妥当性が確認された。今後は、本解析法を多様な形式の流体関連構造物の地震連成振動解析に適用し、研究を進めていく。

謝 辞

本研究の解析コード構築においては、(株)計算力学研究センターの伊藤 元氏および北川和士氏の多大な協力を得ました。ここに感謝します。

参考文献

- 1) C. Y. Liaw, A. K. Chopra: Earthquake Response of Axisymmetric Tower structures Surrounded by water, Report No. EERC 73-25, University of California, Berkeley (1973)
- 2) 中村 嶽, 安楽秀嶽: 固定式海洋構造物の地震応答に関する研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 14, p. 48~51, (1977)
- 3) W. C. Müller: Simplified Analysis of Linear Fluid-Structure Interaction, Int. J. Num. Met. Eng., Vol. 17, p. 113~121 (1981)
- 4) 中村 嶽 武田寿一: 円筒タンクの地震応答に関する研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 27, p. 48~53, (1983)
- 5) 小林信之: 一重及び二重円筒殻と液体の連成振動, 石川島播磨技報, p. 233~237, (1983)
- 6) B. Häggblad, G. Nordgren: Modelling Nonlinear Soil-Structure Interaction Using Interface Elements, Elastic-Plastic Soil Elements and Absorbing Infinite Elements, Computers & Structures, vol. 26, p. 307~324, (1987)
- 7) O. C. Zienkiewicz, P. Bettess: Fluid-Structure Dynamic Interaction and wave Forces, An Introduction to Numerical Treatment, Int. J. Num. Met. Engng., Vol. 13, p. 1~16, (1978)
- 8) 岡田続夫, 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, 川崎技報, No. 59, p. 69~74, (1975)
- 9) 岩田耕司, 他: 汎用構造解析プログラム FINAS による流体-構造物連成振動解析, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, Vol. 12, p. 353~358, (1988)
- 10) 藤田勝久, 他: 二重円筒アニュラス部のスロッシング地震応答(正弦波過渡応答) 日本機械学会論文集(c編), Vol. 52, No. 476, p. 1132~1140, (1986)
- 11) 笠井洋昭: 流体で満たされた多重円筒の連成振動解析, 日本機械学会論文集(c編) Vol. 48, No. 435, p. 1703~1712, (1982)
- 12) 谷 順二, 寺木潤一: 部分的に液体を満たした軸対称殻の自由振動解析, 日本機械学会論文集(c編), Vol. 54, No. 497, p. 73~79, (1988)

1) C. Y. Liaw, A. K. Chopra: Earthquake Response of