

円筒容器内の構造物が 地震時スロッシング現象に及ぼす影響

EFFECTS OF INTERNAL STRUCTURES IN CYLINDRICAL VESSELS ON SEISMIC SLOSHING PHENOMENA

萩原豊* 増子芳夫** 栗原千鶴子**

By Yutaka HAGIWARA, Yoshio MASUKO, and Chizuko KURIHARA

Seismic sloshing phenomena in cylindrical vessels with internal structures were studied for the aseismic design of pool-type FBRs, based on both tests and numerical simulations. A 3-D finite element computer code for fluid-structure coupled vibration including sloshing effects was developed. Then shaking table tests of a cylindrical vessel with internal structures were performed, and the computer code could simulate the test results with remarkable accuracy. The experimental and numerical results showed that the existence of internal structures slightly decreased the sloshing natural frequencies and changed the shapes of the higher modes. Finally, considerable sloshing response reduction effects of internal structures were concluded, because of changes in modal participation factors induced by three dimensional geometrical effects.

1. はじめに

石油タンクに代表されるような自由液面を有する液体容器の耐震設計では、やや長周期地震動による自由液面のスロッシングを考慮する必要がある。円筒タンクのスロッシング評価については、Housnerの先駆的業績¹⁾をはじめとして、航空宇宙工学分野における極めて多岐にわたる研究²⁾など、種々の研究が行われてきた。特に、1964年のアラスカ地震と新潟地震において石油タンク等に甚大な被害を生じてからは、多くの耐震工学者により研究が行われ、解析評価についても、円筒体系、2次元体系を主たる対象として、速度ポテンシャル理論解³⁾⁻⁴⁾、有限要素法⁵⁾⁻⁸⁾、境界要素法⁹⁾⁻¹¹⁾、差分法¹²⁾等に基づく手法が試みられてきた。

一方、原子力プラントや化学プラントを構成する液体容器の中には、容器内に構造物を有するものも多々存在すると考えられる。次世紀におけるわが国の電力供給において、大きな役割を果たすことを期待されている、高速増殖炉(FBR: Fast Breeder Reactor)の原子炉容器もそのような構造物のひとつである。FBRの原子炉容器は直径10~20mのステンレス鋼製の円筒容器であり、その中には自由液面を有する高温の液体ナトリウムが満たされている(図-1)。このため、FBRの原子炉容器の耐震設計では、ナトリウム液面のスロッシングを想定する必要がある。FBRの原子炉容器にはいくつかの構造物が釣り下げられているが、特にタンク型と呼ばれる炉型では原子炉容器内の構造物の数が多く、スロッシング現象に影響を及ぼすことが考えられるため、Sakurari et al.¹³⁾、Chang et al.¹⁴⁾、Ma et al.¹⁵⁾等により検討が行われ

* 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 FBR部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

** (財)電力中央研究所 我孫子研究所 FBR部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

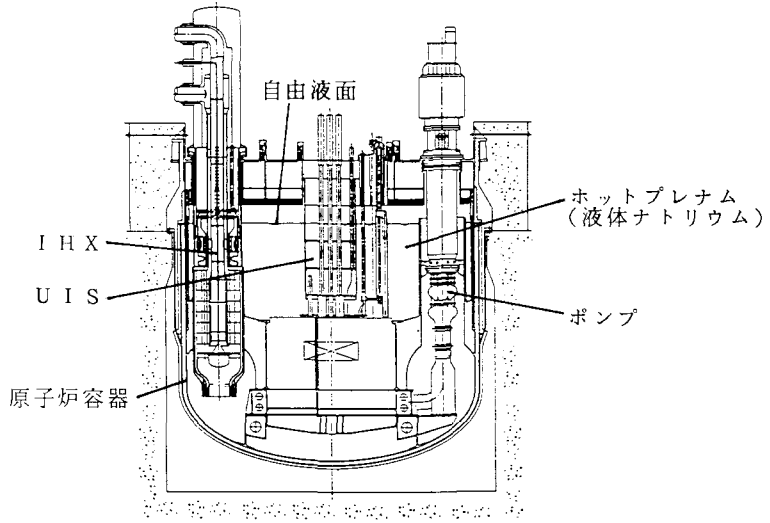


図-1 FBRタンク型炉原子炉構造

ている。Sakuraiらの検討では、内容物がスロッシングの固有周期と減衰に影響を及ぼし、また応答波高を低減することが指摘されているが、波高低減の要因については明かにされていない。

本研究は、タンク型FBRの原子炉容器を評価対象として取り上げ、円筒容器内の構造物が地震時のスロッシング応答特性に及ぼす影響を、数値解析と振動実験の両面から評価したものである。本研究では、まず有限要素法に基づく3次元流体連成振動解析コードを作成し、次に振動台実験との比較により解析コードの検証を行った。さらに、振動実験結果と上記の解析コードによる数値解析に基づき、円筒容器内の構造物がスロッシングの応答特性に対して及ぼす影響を定量的に評価・分析した。

2. 解析手法

2.1 概要

本研究で作成・適用した解析コードLISA (Liquid Inertia and S_lo_shing Analyzer) は有限要素法に基づくものであり、3次元体系について、スロッシングを考慮した流体-構造物連成振動解析を行なうことができる。有限要素定式化においては、非圧縮のポテンシャル流れを仮定し、動液圧を未知量とする一般的な手法を用いた。ただし、流体-構造物連成とスロッシングを同時に取扱い、かつ運動方程式の係数マトリクスを対称化するためにLiu and Ma⁶⁾ が示した手法を参照した。以下に解析手法の概略を示す。

2.2 流体領域の有限要素定式化

非粘性非圧縮性流体が構造物に接し、構造物の運動と連成しつつ微小振幅の非回転運動をするとき、動液圧 p は流体領域 V 中でLaplace方程式を満す。流体の境界条件のうち、自由表面 S_0 については微小振幅波条件を満たし、構造物との連成面 S_1 では連成面に対する構造物と流体の法線方向速度を一致させる。この時、これらの条件を定義する微分方程式の解は次の汎関数 $J(p)$ を停留させる(Euler-Lagrangeの定理)。

$$J(p) = \frac{1}{2} \int_V \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right] dV + \rho \int_{S_1} \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} p dS + \frac{1}{g} \int_{S_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} p dS \quad (1)$$

ここに、 p = 動液圧、 ρ = 流体の質量密度、 g = 重力加速度、 n = 流体の境界に立てた外向き法線、 u_n = 連成面 (S_1) における外向き法線方向絶対変位、 x 、 y 、 z = 3次元直交座標系、である。

流体領域の有限要素定式化を行なうために、節点 i の節点圧力 p_i と節点変位 u_i^x 、 u_i^y 、 u_i^z と、流体系、構造系各々の形状関数 ϕ_i 、 $\tilde{\phi}_i$ を用いて、圧力 p と変位 u を近似すれば(1)式の停留条件は次式で与えられる。

$$\frac{\partial J(p)}{\partial p_i} = 0 \quad \text{for all } i \quad (2)$$

離散化を行うにあたり、流体系を改めて自由表面 S 、連成面 B 、内部領域 I 、の各部分領域に分割し、連成面 B で流体に接する構造系の部分領域を B' とする。なお、以降部分マトリクスを表わす記号の添字は、上記の4つの領域に対応することを表わすものとする。(1)式、(2)式を形状関数と節点量を用いて展開すれば、流体系に関する運動方程式は、次式の形式で得られる。

$$\frac{1}{\rho g} [E] \{\ddot{p}\} + [H] \{p\} + [S] \{\ddot{u}_{B'}\} = 0 \quad (3)$$

ここに、1個の \cdot は時間に関する1階微分を表わす。

各部分領域ごとに示せば、流体系に関するマトリクス形式の運動方程式は下式のようなになる。

$$\frac{1}{\rho g} \begin{bmatrix} E_{SS} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{p}_S \\ \ddot{p}_B \\ \ddot{p}_I \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{SS} & H_{SB} & H_{SI} \\ H_{BS} & H_{BB} & H_{BI} \\ H_{IS} & H_{IB} & H_{II} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_S \\ p_B \\ p_I \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ S_{BB'} \\ 0 \end{bmatrix} \{\ddot{u}_{B'}\} = 0 \quad (4)$$

2.3 スロッシングを考慮した流体-構造物連成系の運動方程式

流体-構造物相互作用を解析するため、構造系も流体系と同様に有限要素離散化を行なう。流体系との連成面に作用する動液圧を考慮すれば、構造系の運動方程式は次式のように書ける。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} + \{R\} - \frac{1}{\rho} S_{BB'}^T \{P_B\} = 0 \quad (5)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $\{u\}$ = 構造物の質量、減衰、剛性の各マトリクスと絶対変位ベクトル、 $\{R\}$ = 外力ベクトル

(5)式(構造系の運動方程式)と(4)式(流体系の運動方程式)を連立して解くに当たり、 p_B 、 p_I は消去し、さらに評価上の便を考えて、

$$\{p_S\} = \rho g \{\eta_S\} \quad (6)$$

により動液圧 p を流体表面の上下変位 η に変換する。これにより、構造系に関する運動方程式(7)式と、流体表面の上下変位(波高) η に関する運動方程式(8)式が得られる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} + \{R\} + \frac{1}{\rho} S_{BB}^T [H^{-1}]_{BS} E_{SS} \{\ddot{\eta}_S\} + \frac{1}{\rho} S_{BB}^T [H^{-1}]_{BB} S_{BB} \{\ddot{u}_{B'}\} = 0 \quad (7)$$

$$[H^{-1}]_{SS} E_{SS} \{\ddot{\eta}_S\} + [H^{-1}]_{SB} S_{BB} \{\ddot{u}_{B'}\} + \rho g \{\eta_S\} = 0 \quad (8)$$

最終的に得られる全体系運動方程式の係数マトリクスを対称にするために、(8)式の両辺に左から正則なマトリクス $\rho^{-1} E_{SS}$ をかけて(9)式を得る。これにより、左辺第1項に転置マトリクスが左右から乗ぜられて対称化され (E_{SS} は対称)、かつ(7)式左辺第5項と(9)式左辺第2項が互いに転置の関係となる。

$$\frac{1}{\rho} E_{SS} [H^{-1}]_{SS} E_{SS} \{\ddot{\eta}_S\} + \frac{1}{\rho} E_{SS} [H^{-1}]_{SB} S_{BB} \{\ddot{u}_{B'}\} + g E_{SS} \{\eta_S\} = 0 \quad (9)$$

最後に、(7)式と(9)式を連立させると最終的な構造物-流体連成系の運動方程式が得られる。この時各係数マトリクスは対称である。なお、剛性の高い容器のスロッシング現象では容器の弾性振動とスロッシングとの連成を無視しうる。この場合には、構造系の全自由度を拘束して、流体系表面自由度 $\{\eta_S\}$ のみの運動方程式を解けばよく、経済的に3次元スロッシング解析を行うことができる。

2.4 流体-構造物連成振動解析コードLISA

本研究では、(7)式の第5、6項と(9)式に関する係数マトリクスを生成する流体-構造物連成振動解析コードLISAを作成した¹⁷⁾。LISAが出力するマトリクスを汎用時間領域動的応答解析コードTDAPに読みこんで構造系モデルに重ね合わせることで、流体-構造物連成系の動的応答解析を行うことができる。LISAは、要素ライブラリとして流体部に関してアイソパラメトリック族6面体1次要素を持つほか、流体自由表面と流体-構造物接触面を定義する自由表面要素、連成面要素を有する。本研究では剛体容器のスロッシング解析を行うため構造要素は使用しない。

3. 解析コード検証のための振動台実験

スロッシング現象への本解析コード(LISA)の適用性を検証するために、振動台を用いた模型実験を実施した。実験模型(図-2参照)はタンク型FBR原子炉容器ホットプレナム部(原子炉容器上部の自由

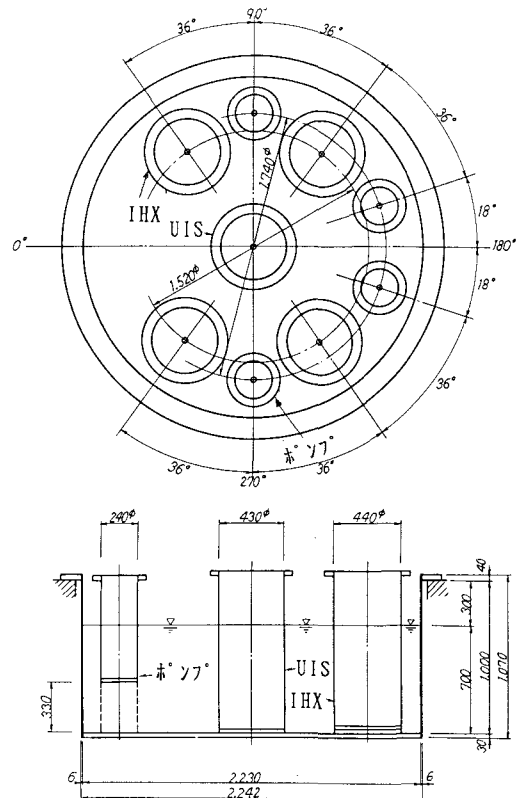


図-2 実験模型

液面を有する領域)の1/10相似模型とした。

3.1 実験の概要

実験は、単純な円筒容器のケース（以降「内容物無し」と呼ぶ）と、円筒容器中にFBRタンク型炉の1次系機器の模擬体を設置したケース（以降「内容物有り」と呼ぶ）の2ケースについて、容器中に水を満たして当所所有の大型振動台により加振し、応答波高を計測することにより行なった。模型の主要部である円筒容器は、振動台上に設置された架台から吊り下げた。模型は、ステンレス鋼（円筒容器）およびアルミニウム（1次系機器模擬体）により製作されており、スロッシングの関与する周期領域では剛体と考えると良い剛性を有している。1次系機器模擬体は、1基のUIS（炉心上部機構）、4基のIHX（中間熱交換器）、4基のポンプ、の各模擬体により構成されている。「内容物有り」のケースでは、UIS、IHX、ポンプは円筒容器底板に固定した。

容器中には、原子炉の冷却材である液体ナトリウムのかわりに常温の水を満たした。水深は全ケース共70cmとした。液体ナトリウムの比重はFBRの運転温度相当の500℃では0.832であり、粘性は常温の水より小さい。このため、重力と慣性力に支配されるスロッシングに関する限り、液体ナトリウムの代わりに水を用いても現象を歪めることはなく、フルード則を介して実機の現象を評価することができる。

計測は、振動台入力変位と模型各部の波高について行った。実験データは、データレコーダー、電磁オシログラフに記録した。加振は、(財)電力中央研究所の大型振動台（テーブル寸法：6m×6.5m、最大積載重量100ton）を用いて行なった。方法は変位制御による水平1方向加振である。実験においては、まず各ケース（内容物無し/有り）について正弦波スイープ加振を行なって、スロッシング非対称1～3次モードについて共振振動数を決定した。次に各々の共振振動数において入力変位±1mm一定で共振正弦30波加振を行なって、波高の過渡応答特性、及び振動モード形に関するデータを得た。

4. 実験との比較による解析コードの検証

ここでは、上記の実験との比較により、解析コードLISAの適用性を検証した結果について述べる。検証は、固有振動数、振動モード形、および共振正弦波加振時の過渡応答特性について行った。

4.1 解析条件

実験体系の対称性を考慮して、解析モデルは内容物無し/有りの2ケースとも、180°モデルとした(図-3参照)。流体領域及び自由液面は各々流体要素と自由表面要素でモデ

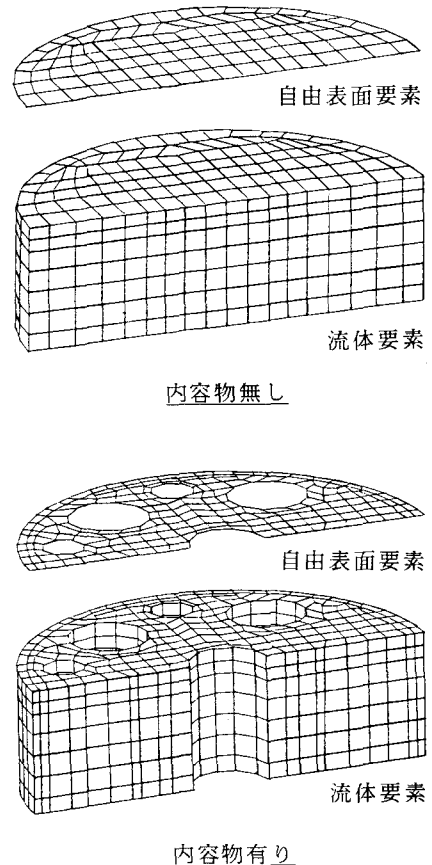


図-3 解析モデル

ル化した。構造物との連成面には連成面要素を付加し、構造自由度は拘束した。流体領域中央の境界面及び底面は、 $\partial p / \partial n = 0$ の条件とした。水の単位体積重量は、 1.00 g/cm^3 とした。

解析としては、解析コードLISA及びTDAPを用いて、固有値解析及びモード重畳法による時刻歴応答解析を行なった。応答解析におけるモード減衰定数は、内容物無しのケースで全モードに対して0.1%、内容物有りのケースで1次モードのみ0.4%、2次以上のモードに対して0.2%とした。これは本研究の実験と同じ模型を用いてほぼ同様の条件で実施した、Sakuraiら²⁰⁾の実験結果に基づいて設定したものである。モード重畳において考慮したモード次数は1~15次であるが、この中には刺激係数が0に近いモードも含まれており、実験で観測されたモード次数とは必ずしも対応しない。このため、以降本論文で参照するモード次数は、実験・解析ともに実験で実際に観測されたモードの次数で表記する。

4.2 実験と解析の比較

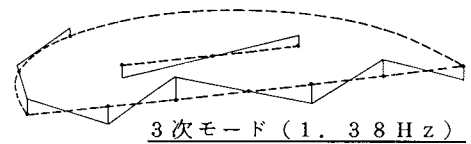
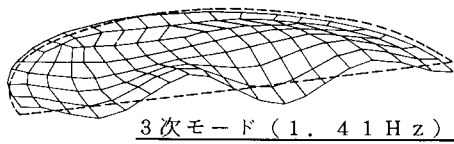
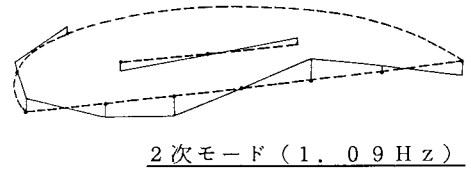
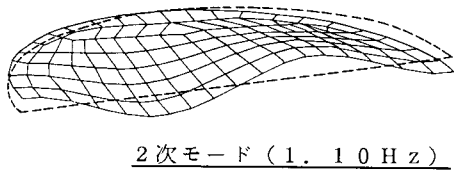
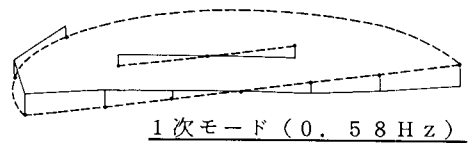
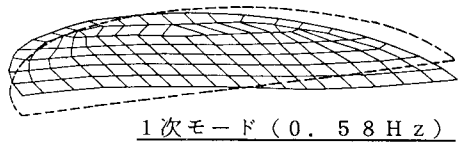
表-1及び図4~5に、スロッシング非対称1~3次モードの固有振動数及び固有モード形について、実験と解析の比較を示す。表-1には速度ポテンシャル理論による線形理論解も併せて示した。表-1によれば、内容物無し、有りのケースともに、固有振動数に関して解析結果は実験結果と良く一致している。モード次数が高次となるほど、解析結果は実験結果より高めの固有振動数を与える傾向にあるが、両者の違いは高々0.03Hz以下にすぎない。2ケースの結果を比較すると、内容物が存在することにより、スロッシングの固有振動数は各次ともわずかに低下しているが、解析結果はこのわずかな変化を良く再現している。

次に、図4~5によれば、固有モード形に関しても内容物無し、有りの場合ともに、解析結果は実験結果と良く一致している。円筒容器では理論的にも実験的にも水平加振時のスロッシングモードの周方向波数は各次とも1波となるのに対して、内容物により体系が非軸対称となった場合には、周方向波数は必ずしも1波とはならない。図-5によれば、本解析コードは上記の様な、体系の3次元性による周方向波数の変化に関しても、実験結果を良く表現できることが判る。解析結果によれば、内容物有りのケースにおいて、2次モード、3次モードの周方向波数は、各々3波と7波が卓越していることが判る。

図-6~7に、共振正弦n波加振時の最大応答波高に関して、実験と解析の比較を示す。評価対象とした測点は容器中央断面容器壁沿いの測点(図-2の0°方向)である。図-6~7によれば、内容物有り・無しにかかわらず、解析結果は実験結果と良く一致している。2次・3次モードでは、解析結果は実験結果を若干上回る傾向にある。これは、実験では各々の励振振動数に対応するモードのみが刺激されたのに対して、

表-1 固有振動数

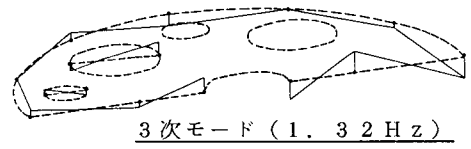
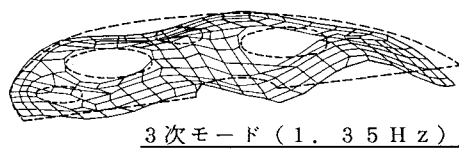
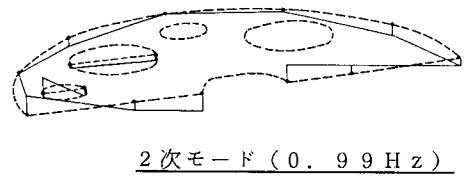
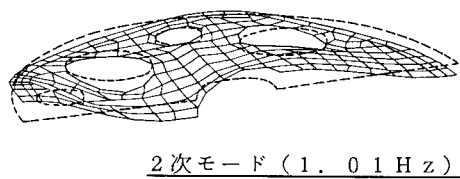
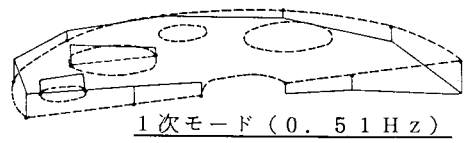
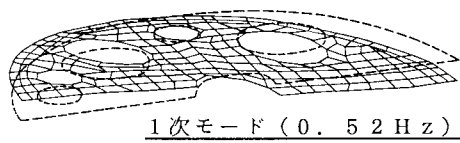
ケース	モード 次数	固有振動数(Hz)		
		実験	FEM解析	理論解
内容物無	1次	0.58	0.58	0.58
	2次	1.09	1.10	1.09
	3次	1.38	1.41	1.38
内容物有	1次	0.51	0.52	/
	2次	0.99	1.01	
	3次	1.32	1.35	



FEM解析 (LISA)

実験

図-4 振動モード形 (内容物無し)



FEM解析 (LISA)

実験

図-5 振動モード形 (内容物有り)

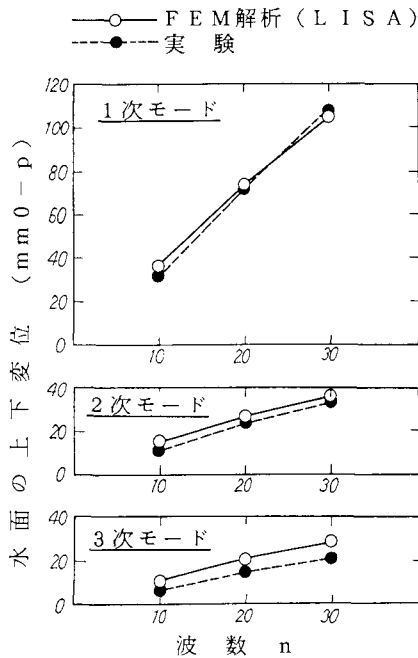


図-6 共振正弦波加振時の波高（内容物無し）

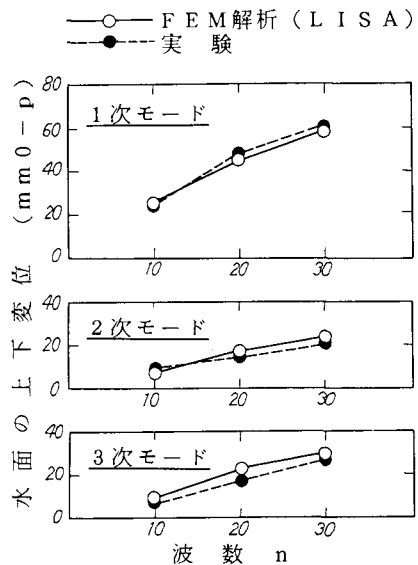


図-7 共振正弦波加振時の波高（内容物有り）

解析においては1次モードがわずかに刺激され、2次・3次モードに重畳したことによる影響が現われたものである。解析においてのみ1次モードが高次モードに重畳した原因としては、解析の入力波として実験で計測された入力波ではなく数値的に生成した正弦波を用いているため、入力条件に若干の差異を生じたことが考えられる。

5. 円筒容器内の内容物が地震時のスロッシング応答に及ぼす影響

上記の実験結果・解析結果から明らかな様に、円筒容器内に設置された構造物（内容物）は、水平地震により励起されるスロッシングの応答特性に種々の影響を及ぼし、以下の点において単純な円筒容器とは異なる応答特性を示す。

(1) 固有振動数の低下

表-1によれば、内容物を有する円筒容器内のスロッシングの固有振動数は、少なくとも1～3次に関しては、同一内径同一液深の円筒容器のスロッシングの固有振動数よりもわずかながら低い値を示す。この固有振動数の低下は、内容物を流れるが迂回するため実効的に重複波の波長が長くなることにより生ずると考えられ、当然内容物の寸法、配置に依存する。同様の現象はすでにLambがその著書¹⁸⁾の中で解説している。

(2) 固有モード形の変化

図-4～5によれば、内容物の存在により、特に2次以上のスロッシングのモード形は、周方向に多くの波数を持つものとなる（単純円筒の場合、水平加振で励起される振動モード形の周方向波数は線形理論によれば常に1のみである）。

(3) 応答波高の低減

図-6と図-7を比較すると、内容物有りのケースの共振正弦波加振時の応答波高は、1次モード、2次

モードについては、内容物無しのケースにくらべて低い。ただし、3次モードについては、内容物有りのケースの方がわずかながら大きい。このような応答波高の変化は、減衰の変化か刺激係数（正確には刺激係数×モードベクトル）の変化によって生ずるが、減衰の変化については、すでに述べたように、Sakuraiらが、内容物の存在により減衰定数が増加することを指摘している¹³⁾。

次に、刺激係数の変化の影響を明らかにするために、内容物有り/無しの2ケースの1～3次の各モードについて、モード減衰定数を全てゼロとして、共振正弦30波加振時の応答解析を行なった。内容物の有り/無しによる応答波高の変化を図-8に示す。同図の結果は、内容物の有無に基づく刺激係数の変化のみによる応答波高の変化を示す。同図によれば、内容物の存在により1次モードの刺激係数が大きく低減することが明かである。2～3次モードについては、内容物の有無による差が小さいが、一般に地震時のスロッシングは、刺激係数が最も大きい1次モードに支配され、2～3次モードの影響は小さい。本解析で対象とした体系では、実際の地震時にも1次モードの刺激係数低減の影響が卓越し、内容物の存在はスロッシングを抑制するように働くと考えられる。

内容物が円筒容器のスロッシングの応答特性に及ぼす上記の影響のうち、特に刺激係数の変化は耐震設計上重要な意味を持っている。すなわち、スロッシング応答では固有周期が長く減衰が非常に小さいため、多少の減衰の変化は実地震動による過渡的な応答には大きな影響は及ぼさないが、刺激係数の増減に対しては、それに比例して応答の増減がもたらされる。したがって、内容物を有する円筒容器の耐震設計においては、内容物の存在による3次元的な形状効果が刺激係数に及ぼす影響について注意すべきである。

6. 結論

本研究は、有限要素法に基づく3次元流体-構造物連成振動解析コードによる数値解析と、振動実験の結果に基づいて、円筒容器内の内容物が地震時スロッシング現象に及ぼす影響を定量的に評価したものである。評価の結果、今回対象としたタンク型FBRの原子炉容器では、内容物の存在はスロッシングの固有振動数の低下、減衰の増加、およびモード形状と刺激係数の変化に基づく応答波高の低減をもたらすことが明らかとなった。特に内容物の存在がスロッシング1次モードの刺激係数を変化させ、地震時の応答波高に影響を及ぼすことは、プラント構造物の耐震設計上重要と考えられる。

謝辞

本研究の中で流体-構造物連成振動解析コードLISAを開発するにあたり、(株)アーク情報システム解析第2部の内田富夫氏と佐藤順一氏の協力を得たことを付記し、ここに感謝の意を表します。

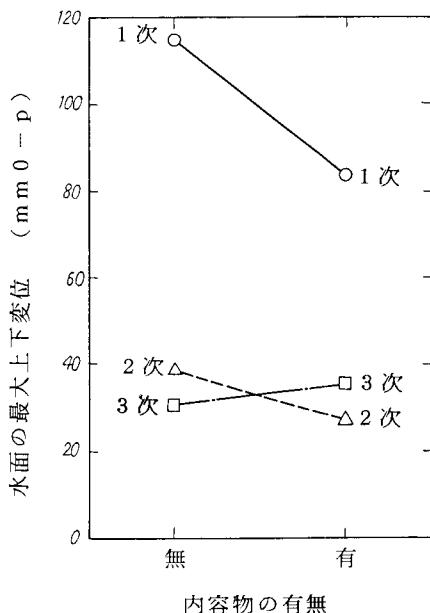


図-8 内容物の有無による応答波高の変化

参考文献

- 1) Housner, G.W. : Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 47, pp15~35
- 2) Abramson, H.N. : The Dynamic Behaviour of Liquids in Moving Containers, NASA, SP-106, 1966
- 3) 曾我部潔, 柴田碧 : 円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第1報-基礎式と正弦波解-, 生産研究, 26巻, 3号, pp31~34, 1974
- 4) Aslam, M., Godden, W.G., Scalise, D.T. : Earthquake Sloshing in Annular and Cylindrical Tanks, J. of Eng. Mech. Div., Proc. of ASCE, Vol.105, No.EM3, pp371~389, 1979
- 5) 木村憲明, 大橋弘隆 : 軸対象容器にけるスロッシングの非線形応答 (第1報, 支配方程式の導出と解の性質), 日本機械学会論文集 (第1部), 44巻, 385号, pp3024~3033, 1978
- 6) Nakayama, T., Washizu, K. : Nonlinear Analysis of Liquid Motion in a Container to Forced Pitching Oscillation, Int. J. of Num. Meth. in Eng., Vol.15, pp1207~1220, 1980
- 7) Aslam, M. : Finite Element Analysis of Earthquake-induced Sloshing in Axisymmetric Tanks, Int. J. of Num. Meth. in Eng., Vol.17, pp159~170, 1981
- 8) Liu, W.K., Uras, R.A. : Variational Approach to Fluid-Structure Interaction with Sloshing, Nuc. Eng. & Des., Vol.106, pp69~85, 1988
- 9) Nakayama, T., Washizu, K. : The Boundary Element Method Applied to the Analysis of Two-Dimensional Nonlinear Sloshing Problems, Int. J. of Num. Meth. in Eng., Vol.17, pp1631~1641, 1981
- 10) Haroun, M.A. : Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks, Earthq. Eng. & Str. Dyn., Vol.11, pp179~206, 1983
- 11) Shiojiri, H., Hagiwara, Y. : Development of a Computational Method for Nonlinear Sloshing by BEM, ASME PVP-Vol.191, pp149~154, 1990
- 12) Su, T.-C., Wang, Y., : Numerical Simulation of Three-Dimensional Large Amplitude Liquid Sloshing in Cylindrical Tanks Subjected to Arbitrary Excitations, ASME PVP-Vol.191, pp127~148, 1990
- 13) Sakurai, A., et al. : EPRI/CRIEPI Joint Program on Seismic Sloshing of LMR reactors : Part I - Experiments, SMiRT-9, VOL.E, pp447~452, 1987
- 14) Chang, Y.W., et al. : EPRI/CRIEPI Joint Program on Seismic Sloshing of LMR reactors : Part II - Numerical Simulations, SMiRT-9, VOL.E, pp453~458, 1987
- 15) Ma, D.C. et al. : Dominant Seismic Sloshing Mode in a Pool-type Reactor Tank, SMiRT-9, Vol.E, pp465~470, 1987
- 16) Liu, W.K. and Ma, D.C. : Coupling Effect between Liquid Sloshing and Flexible Fluid Filled System, Nuc. Eng. & Des., 72, pp345~357, 1982
- 17) 萩原豊, 増子芳夫, 栗原千鶴子 : 3次元流体-構造物連成振動解析コードの開発とタンク型FBRの地震時スロッシング応答解析, 電力中央研究所報告 NO.U90009, 1990
- 18) Lamb, H. : Hydrodynamics, 6th Ed., Cambridge at the University Press, 1932

(1990年10月12日受付)