

振動試験による円筒形貯水タンクの耐震性評価（第5報） —新しい動的座屈解析手法の提案—

Evaluation of Seismic Characteristics of Cylindrical Water Storage Tank by Vibration Test (5th Report) —Proposal of a New Dynamic Buckling Analysis Method—

前川 晃 (Akira Maekawa)*¹ 藤田 勝久 (Katsuhisa Fujita)*²

要約 本論文では、有限要素法を用いた新しい動的座屈解析手法を提案し、この手法が原子力発電所等で使用されている大型の円筒形貯水タンクの地震応答や座屈挙動を十分に解析可能であることを示す。提案する手法では、幾何学的非線形性を考慮できるシェル要素によりタンク構造体を3次元モデル化し、内部水をオイラー方程式に従うソリッド要素でモデル化する。さらに、タンク側板と内部水との流体構造連成をALE法により考慮して、陽的時間積分法を用いた時刻歴解析により動的弾塑性座屈解析を行う。まず、既報で報告した動的座屈実験を対象にしてオーバル振動の発生や座屈モードについて解析結果を実験結果と比較し、提案する手法の適用性を評価した。次に、異なる形状のタンク試験体を対象として比較を行った。これらの結果は、提案する動的座屈解析手法が地震時のタンクの座屈挙動を高精度にシミュレーションできることを示した。

キーワード 原子力発電所、円筒形貯水タンク、地震応答、座屈、動的座屈解析、オーバル振動、数値シミュレーション

Abstract This paper proposes a new dynamic buckling analysis method using the finite element method and demonstrates that the proposed method can adequately analyze the seismic response and buckling behavior of large-scale cylindrical water storage tanks installed in nuclear power plants. In the proposed method, the tank structure is modeled three-dimensionally by shell elements allowing geometric nonlinearity to be considered, while the water contained in the tank is modeled by solid elements which comply with Euler's equation. In addition, fluid-structure coupling between the tank wall and the contained water is calculated by the ALE method and the dynamic elastic-plastic buckling analysis is conducted by time-history analysis using the explicit time integration method. First, the analytical results are compared with the results of the buckling experiment reported in the previous paper concerning the occurrence of oval-type vibration and the buckling mode, and then the applicability of the proposed method is discussed. Secondly, a test tank of different shape and size is compared. The results showed that the proposed dynamic buckling analysis method can accurately simulate the buckling behavior of the tanks during a large earthquake.

Keywords nuclear power plant, cylindrical water storage tank, seismic response, buckling, dynamic buckling analysis, oval-type vibration, numerical simulation

1. 緒言

2007年7月に発生した新潟県中越沖地震により、東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所が被災^{(1)~(7)}した。想定を超える地震動により耐震重要度分類において重要度が下位のCクラスの機器にかなりの損傷が発生した。しかしながら、重要度が上位のSクラスの

機器には被害が報告されておらず、我が国の原子力発電所の耐震設計の妥当性が図らずも示されたと言える。一方、この地震は原子力発電所のさらなる耐震安全性の確保に向けた課題を示したとも言える。埋設管の継手構造の脆弱性や耐震重要度クラスが異なる機器間の接続箇所の構造について注目されているが、Cクラスとは言え、大型の貯水タンクが座屈

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 研究指導顧問

したことも注目に値すると考えられる。純水タンクにスロッシングによると思われる側板の座屈が生じたことや、ろ過水タンクに象脚座屈が発生し、座屈に伴う亀裂から内部水が喪失したと報告⁽⁸⁾されている。同じ敷地内にもかかわらず座屈モードが異なったという原因を調べ、今後のタンクの耐震設計へ反映させることは、さらなる耐震安全性を確保するために必要なことである。タンクの構造は、異なる耐震重要度クラスにおいて大きな違いはなく、また、他産業で使用されているタンク構造と同様であるため、異なる座屈モードが発生した原因説明は設計工学上、有益な情報になると考えられる。

円筒形貯水タンクの耐震設計は、1970年代以前はタンクを剛体とみなした設計が行われていた。1970年代後半から Housner⁽⁹⁾により提案されたタンク構造体を剛体容器とし、内部水の液体としての性質を考慮する Housner 理論による設計が主流となった。この理論によりタンクへ作用する地震力以外に動液圧やスロッシング変位の考慮が行われるようになった。1980年代以降、Veletsos⁽¹⁰⁾や Fischer⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、藤田⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾らにより、タンクが振動する時の側板の変形を考慮する弾性容器・液体モデルが提案された。バルジングと言われるタンクの振動モードがスロッシングとともに考慮されるようになり、内部水の動的挙動が耐震設計に反映されるようになった。しかしながら、これらの設計方法はタンクの地震応答に着目しており、ベースシアを評価するのみで、タンク形状の違いによって生じる座屈モードの違いについては考慮していない。

秋山^{(15)~(17)}は、数多くの円筒容器の静的座屈実験結果から、液圧によってタンク側面に生じるフープ応力とタンク構造体の降伏応力の比がタンクの座屈モードに影響を与えることを見出し、タンク形状の違いによって生じる座屈モードの違いを考慮した設計方法を提案している。この設計方法は、日本建築学会の容器構造設計指針⁽¹⁸⁾や高圧ガス保安協会の高圧ガス設備等耐震設計指針⁽¹⁹⁾、神奈川県の高圧ガス施設等耐震設計基準⁽²⁰⁾に取り入れられている。しかしながら、静的実験をベースにしており保守的評価がなされていると考えられる一方、動的効果の考慮が十分に反映されていないとの指摘⁽²¹⁾もされている。さらに、既報^{(22)~(25)}で指摘しているように、タンクは地震時に耐震評価上重要な振動モードであるビーム振動以外にオーバル振動というタンク側板で花びら状に振動する高次振動モードが発生し、ビー

ム振動に影響を与えるが、上記の指針・基準では、このような高次振動モードは無視されている。ここで、ビーム振動とは軸方向半波数 $m \geq 1$ 、周方向波数 $n = 1$ で表される振動モードのことであり、オーバル振動とは $m \geq 1$ 、 $n \geq 2$ で表される振動モードである。秋山の方法は、タンクを設計する上で非常に有益な方法であるが、タンクの地震応答や耐震安全裕度を詳細に評価する、あるいは地震による損傷の発生機構を解明するには不十分である。

耐震安全裕度といったタンクの耐震性能を評価するには、試験体による振動実験が候補として考えられるが、大型タンクを対象にした場合は模型実験となるため、模型の挙動と実機の挙動とを関連付けなくてはならないという短所がある。最近進歩の著しい数値解析技術を用いて数値解析実験を行うことができれば、上記の課題を解決するひとつの方法になり得る。

本論文では、有限要素法を用いた新しい動的座屈解析手法を提案し、この手法がタンクの地震応答や座屈挙動を十分に解析可能であることを示す。まず、既報⁽²⁶⁾で報告した動的座屈実験結果から、加振実験時に観察されたオーバル振動の発生や座屈モードについて明らかにする。次に、現行の座屈解析手法と比較しながら、提案する動的座屈解析手法について述べる。最後に解析により得られたオーバル振動や座屈の発生状況を実験と比較する。さらに、別の形状のタンク試験体を対象として動的座屈解析を実施し、実験結果と比較する。これらの結果を基に、提案する解析手法の妥当性について述べる。

2. 動的座屈実験

大型の振動台実験装置を用いてタンク試験体の動的座屈実験を行った。振動台実験装置の仕様は既報⁽²⁶⁾で述べたとおりである。実験方法も既報⁽²⁶⁾で述べているが、主要な点を以下に示す。実験に使用したタンク試験体を図1に示す。タンク試験体は、原子力発電所で使用されている耐震重要度分類Sクラスの燃料取替用水タンクや復水タンクといった大型の円筒形貯水タンクの約1/10の縮尺モデルとした。ただし、加振時の試験体の応答を大きくするために、試験体頂部に200kgの重錘を載せている。図1に示すレーザ変位計の設置している方向を 0° としている。

タンク試験体は直径900mm、高さ1200mm、板厚

1mm のアルミ合金製円筒の上下部を炭素鋼製フランジで両端固定し、ポリカーボネート製の天板を設置した形状としている。円筒は平板を曲げて両端をTIG溶接で接合して製作した。円筒の形状初期不整は、光学式の形状計測装置で計測し、初期不整量分布は解析時のモデルへ反映させた。座屈評価において重要な形状パラメータである高さ／半径比は2.67であり、半径／板厚比は450である。タンク試験体は架台を介して振動台に設置した。この架台は板厚2mmの炭素鋼製であり、加振時に試験体の反力により弾性ひずみが発生するので、発生した弾性ひずみを測定し、この弾性ひずみ量を基に試験体の下端部に発生したせん断力や曲げモーメントを算定した。タンク試験体頂部には加速度計を設置し、ビーム振動の挙動を測定した。試験体に対して 0° の方向にレーザ変位計を設置した。レーザ変位計は高さ1200, 870, 680, 290mmに設定し、加振により生じた試験体の変位を測定した。高さ1200mmでの値はビーム振動の変位を示し、その他の値はそれぞれの高さにおけるオーバル振動の変位を示す。図1に見られるように、高さ700mmの -18° から 138° の範囲や 0° 位置の高さ方向などにひずみゲージを貼り付けて、ビーム振動やオーバル振動によって生じるひずみを測定した。 90° 側の側面に対してビデオ撮影を行い、加振時のオーバル振動の発生状況を観察した。

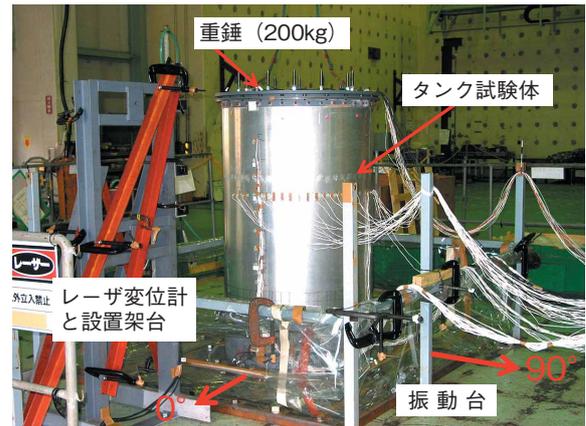


図1 タンク試験体の写真

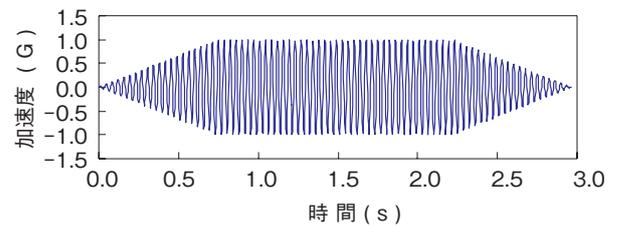


図2 入力に使用した時刻歴波形の例

表1 座屈実験の試験条件一覧

加振回数	入力加速度 (G)	加振振動数 (Hz)	水位 (%)
1回目	1.05	27Hz	95
2回目	2.37	27Hz	95
3回目	2.52	27Hz	95

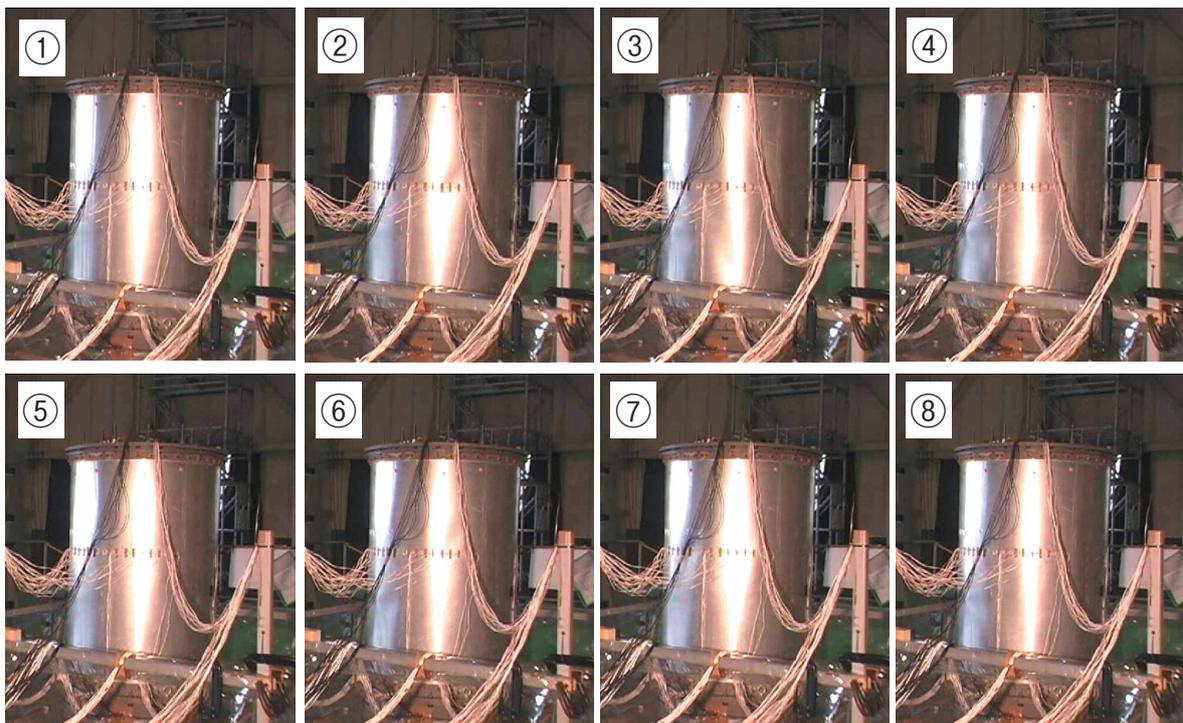


図3 タンク試験体側面に発生したオーバル振動の挙動 (90° 側面)

タンク試験体は、95%水位（高さ 1140mm）まで内部を水で満たし、 0° と 180° との間で正弦波加振を行った。加振振動数以外の振動数成分が入力波に含まれないように、図 2 に示すように前後を漸増、漸減とした正弦波を使用した。予備試験として正弦波の周波数スイープ試験を行い、200kg の重錘を載せた状態のタンク試験体の 1 次モードの固有振動数を求めた結果、27.66Hz であった。そこで、本実験では加振振動数として 27Hz を用いた。試験は表 1 の試験条件に示すように入力加速度を変えて 3 回の加振を行った。この表が示す入力加速度の大きさは図 2 に示す入力波形が定常状態となった時の加速度の大きさを表している。

3. 動的座屈実験結果

図 3 に加振時のタンク試験体側面の挙動を撮影したビデオから特徴的な数コマを抜粋して示す。図は 90° 側の状況であるが、光を当ててその陰影で側板の振動挙動を示している。中央部の光の反射部は、①から⑧コマの間に軸方向に対して太ったり痩せたりして、光の当たり具合が変化している。これは、タンク試験体の側面の形状が時間とともに大きく変化していることを示している。すなわち、オーバル振動が発生し、大きく振動していることを示す。

既報⁽²⁶⁾で報告したとおり試験体は座屈し実験後に塑性変形が残った。図 4 は座屈により発生した塑性変形を示す。タンク試験体の側面にせん断座屈によると考えられる変形や下端部に曲げ座屈のひとつであるダイヤモンド型座屈と言われる内側に凹んだ変形が残留しており、座屈モードを判別し難いが、発生した曲げ応力やせん断応力と設計許容値⁽²⁷⁾との比較（表 2 参照）を行い、発生した曲げ応力が許容値を超えていることから、曲げ座屈が主として発生したと評価した。

表 2 座屈荷重の評価

	実験値 (N/mm^2)	設計許容値 (N/mm^2)
曲げ応力	97.18	47.02
せん断応力	33.45	54.65

4. 動的座屈解析

従来のタンクの地震応答解析はオーバル振動を考慮していない線形応答解析のため、オーバル振動の

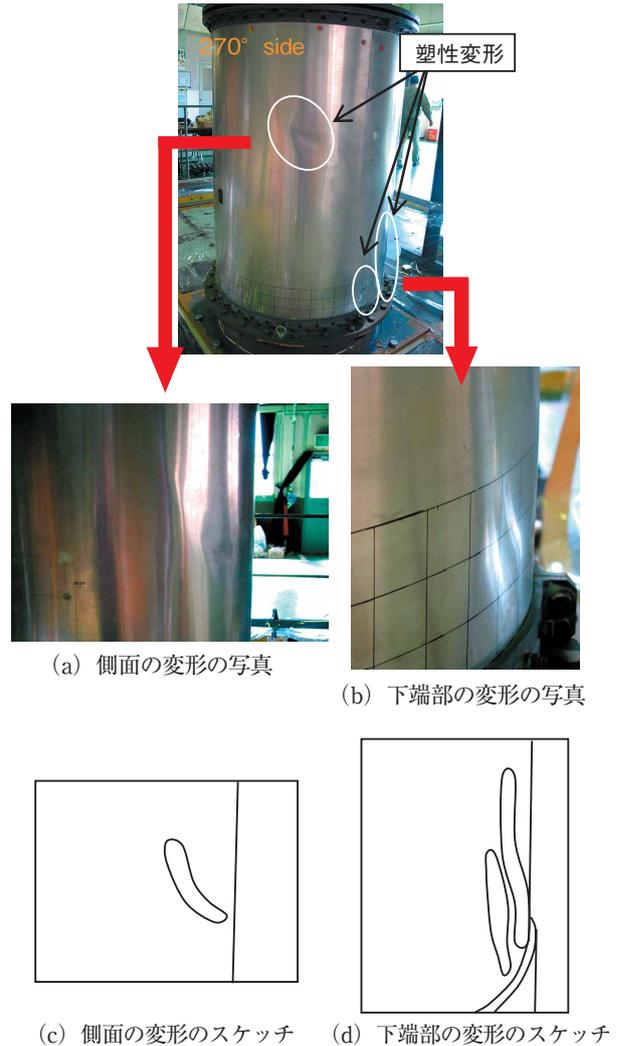


図 4 座屈実験後の残留変形

影響によるタンクの非線形振動応答現象をシミュレーションできず、保守的な設計手法としては適当であるが、実現象の把握や耐震安全裕度の把握には適していない。既報⁽²⁸⁾において、前川らは貯水タンクを対象とした非線形振動応答解析手法を提案した。この手法は、幾何学的非線形性を考慮できるシェル要素⁽²⁹⁾を用いてタンク構造体を 3 次元モデル化し、内部水をオイラー方程式に従うソリッド要素でモデル化して、Arbitrary Lagrangian-Eulerian 法 (ALE 法) により内部水とタンク構造体との流体構造連成を考慮するというものである。

この提案した手法による解析結果と実験結果との比較により、非線形オーバル振動の発生や励振された振動モード次数が定量的によく一致し、提案した手法がオーバル振動の挙動を高精度にシミュレーションできることを示すと同時に、オーバル振動の影響によるタンクの非線形振動応答についてもその

表3 提案する解析手法と従来法との比較

比較項目	本提案手法	従来手法
内部水の挙動の考慮	内部水をモデル化し、内部水とタンク構造体との相互作用を逐次計算途中で見直し、結果を内部水の挙動へ反映する	内部水はモデル化せず、付加質量としてタンク構造体の運動方程式の質量行列に加える
オーバル振動の考慮	オーバル振動による側板の大変形を考慮する	オーバル振動の発生は考慮しない
3次元モデル化	シェル要素を用いるので、非対称物もモデル化可能	軸対称要素を用いるので軸対称物が対象となる
解法	中央差分の陽解法	Newmark β 法
幾何学的非線形性	剛体変位除去の手法により、低次の非線形項までの簡単な構成式で、計算効率と解析精度を高める	構成式として、高次の非線形項まで採った複雑な式を解くことで、解析精度を高める
材料的非線形性	応力-ひずみ線図を十数点の多直線で近似した弾塑性モデルとする	応力-ひずみ線図を数点の多直線で近似した弾塑性モデルとする

表4 解析に用いた材料定数

材料	項目	ヤング率 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/m ³)	体積弾性率 (MPa)
アルミ合金 (A5052) (試験体円筒部)		69420	0.33	2680	-
炭素鋼 (フランジ・架台)		203000	0.3	7800	-
ポリカーボネート (天板)		1960	0.3	11900	-
水		-	-	1000	2200

表5 解析の入力条件

入力項目	入力条件
入力波	実験と同様な正弦波
入力加速度	2.5G
入力振動数	31Hz
加振方向	0° - 180° 間の水平方向加振

挙動を高精度にシミュレーションできることを報告⁽²⁸⁾している。

本研究では、この手法を動的座屈解析に適用する。座屈後の塑性変形までをシミュレーションするために、材料的非線形性を取り入れて弾塑性解析として実施した。提案する手法の特徴を従来法⁽³⁰⁻³⁴⁾と比較して表3に示している。表3が示すように、より実現象に近いシミュレーションが可能となっている。

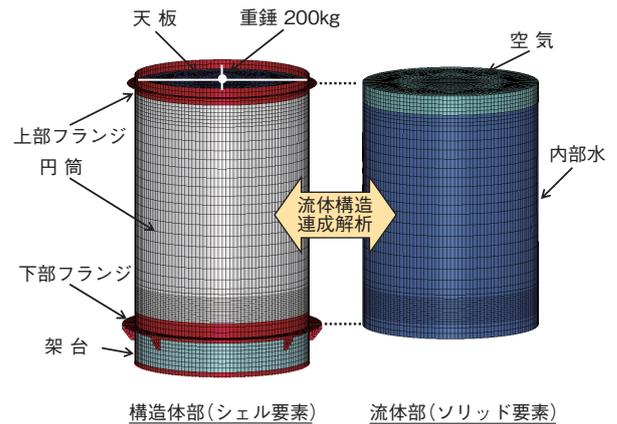


図5 解析モデル

図5は使用した解析モデルを示す。節点総数は67527であり、要素数は71960である。解析モデルは構造部をシェル要素とし、流体部をソリッド要素としている。200kgの重錘はモデル上部と剛体結合した節点に付加質量として考慮した。95%水位まで水の物性を反映した。残りの5%は空気であるため、空 (Void 要素) として設定した。また、タンク試験体の形状計測結果から得られた形状初期不整量分布を解析モデルに設定した。本解析に用いた材料定数を表4に示す。円筒に用いたアルミ合金の応力-ひずみ線図はタンク試験体の製作に使用したアルミ合金板の一部を試験片に加工し、引張り試験を行い求めた。解析モデルに、この応力-ひずみ線図を多直線近似して設定し、弾塑性モデルとした。架台等に用いた炭素鋼の材料定数は日本機械学会設計建設規格⁽³⁵⁾に基づいて設定した。ポリカーボネートは製造メーカーの公称値を用いた。

図5に示す解析モデルのようにオイラー方程式に従う要素を含む場合は固有値解析を行えない。したがって、解析モデルに三角波をショック波として与え、自由振動挙動をシミュレーションし、応答波形を周波数分析することで、解析モデルの1次のビーム振動の固有振動数を求めた。本モデルの固有振動数は30.45Hzであった。分解能は0.5Hzである。よって、加振振動数として31Hzを設定した。この加振振動数をもつ正弦波を入力として前述の動的座屈実験をシミュレーションした。解析の入力条件を表5にまとめて示す。実際の解析には汎用有限要素法解析コードのLS-DYNA⁽³⁶⁾を用いた。

5. 動的座屈解析結果

図6は、タンク試験体の振動実験および4章に述べた三角波を入力にして数値解析的に求めた1次のビーム振動の固有振動数を示す。さらに、参考として、図5の解析モデルを再構築して別途実施したタンク試験体の固有値解析結果を示す。固有値解析は汎用有限要素法解析コードのNastran⁽³⁷⁾を用いてVirtual mass法により求めた。図中の m は軸方向半波数を表し、 n は周方向波数を表す。実験、解析ともほぼ一致しており、解析モデルの妥当性が確認できる。

表5に示した入力条件により時刻歴解析を実施し、得られた解析モデルの時刻歴応答について以下に述べる。図7は解析により得られたモデルの270°側の変形図を示す。図7の変形倍率は10倍にしている。タンク側面が大きく変形しオーバル振動が発生している。タンクの下端部は内側に大きく凹み、曲げ座屈が発生している。この挙動は実験で観察された結果と一致している。これらの結果は提案する動的座屈解析手法が実験で発生する座屈モードや座屈時の

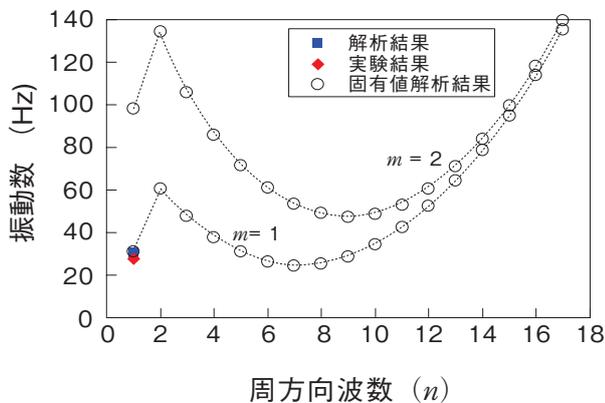


図6 固有振動数の比較（解析値および実験値）

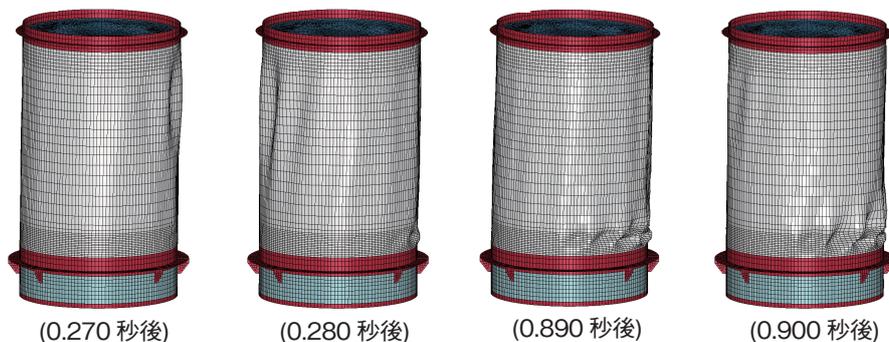


図7 解析結果：270°側のタンク側面の変形図（変形倍率10倍）

応答を高精度にシミュレーションできることを示している。

6. 異なる形状の円筒形貯水タンクに対する適用性評価

前述の解析対象は、実機の約1/10縮尺モデルの実験結果と比較したものであり、さらに別の形状で、寸法のより大きな貯水タンク試験体を対象にして検討すれば、提案する動的座屈解析手法の実機への適用性を評価できると考えられる。大型のタンク試験体を用いた動的座屈実験は、過去に、高压ガス保安協会による鋼製平底円筒貯槽の耐震実験⁽³⁸⁻⁴⁰⁾や(財)発電設備技術検査協会による発電設備耐震信頼性実証試験⁽⁴¹⁾が実施されている。最近、伊藤ら^(21,42-45)が加圧水型原子力発電所の燃料取替用水タンクや復水タンクを縮尺モデル化した大型のタンク試験体を用いて動的座屈実験を実施している。この実験の主な成果は公開されていることから、この実験結果をベンチマークとして、本研究で提案する動的座屈解析手法の適用性を評価する。

伊藤らの実験⁽²¹⁾では異なる形状の2種類のタンク試験体を製作し座屈実験に供している。本研究では、より実機の寸法に近いNo.1タンクを対象として解析を行う。対象としたタンク試験体の写真⁽⁴²⁾を図8に示す。タンク試験体は直径2500mm、高さ3300mm、水位3033mm、板厚2mmのアルミ合金製である。高さ/半径比は2.64であり、半径/板厚比は625となる。前述の1/10縮尺のタンク試験体と比較して、約1/3縮尺モデルであり、形状は若干異なっている。このように寸法および形状が異なることから、図9に示すとおり、実験で発生した座屈モード⁽²¹⁾はタンク下端部での象脚座屈であり、前述のタンク試験体に発生したダイヤモンド型の座屈

モードとは異なっている。

タンク試験体の諸元を基にして作成した解析モデルを図10に示す。4章で述べたように、タンク構造体に対して幾何学的非線形性を考慮できるシェル要素⁽²⁹⁾でモデル化し、内部水とタンク内部の気相部をオイラー方程式に従うソリッド要素でモデル化した。気相部は密度を小さくしてVoid要素としている。流体構造連成解析はALE法により実施した。解析モデルは対象性を考慮してタンク試験体の半分だけをモデル化した。モデルの節点総数は2757で、要素数は2256である。

解析モデルの1次のビーム振動の固有振動数は、前述したとおり、三角波による応答波形を周波数分析することで求めた。解析モデルの固有振動数は15.6Hzであった。図11に、1次のビーム振動について解析モデルから求めた固有振動数と実験⁽²¹⁾で得られた固有振動数(14.4Hz)を示す。図11には、伊藤らによる固有値解析結果⁽⁴⁵⁾とNastran⁽³⁷⁾による固有値解析の結果を合わせて示す。本研究の解析モデルの固有振動数と実験値との差は約1Hzであり、解析モデルとして妥当と考えられる。

まず、解析モデルの座屈モードを確認するために、図12に示す時間の経過とともに加速度振幅が大きくなる正弦波入力による解析を実施した。解析条件として、加振振動数は、1次のビーム振動の固有振動数に一致する15.6Hzを選んだ。加振方向は 0° と 180° との間で水平方向とした。

図13に解析の結果得られた変形図を示す。図の変形倍率は10倍としている。モデル下端部に約1.5秒から象脚座屈が発生し、時間とともに座屈が成長した。さらに、側面にはオーバル振動が発生した。図14はオーバル振動の周方向波数を確認するために解析モデルを上方から眺めた図である。周方向波数 n は7と考えられる。図13より軸方向半波数 m は1である。図11の固有値解析結果から、この振動モードを評価すると、加振振動数の約1/2の振動数に固有振動数を持つモードに対応している。図15は、 0° 方向で高さ2420mmの位置のオーバル振動による側面変位の時刻歴に対して周波数分析した結果を示す。加振振動数15.6Hzの正弦波で加振しているため、15.6Hzに共振のピークが生じている。その他に加振振動数の1/2に対応する7.8Hzに、より大きなピークがある。これは、加振振動数の1/2の振動数の固有振動数を持つオーバル振動が発生していることを示す。すなわち、1/2分数調波のオーバル振動、



図8 解析対象とした大型タンク試験体の写真⁽⁴²⁾

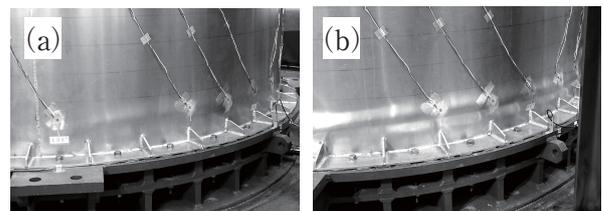


図9 実験で発生した象脚座屈(入力加速度レベル: (a) 1.8Se, (b) 3.6Se)⁽²¹⁾

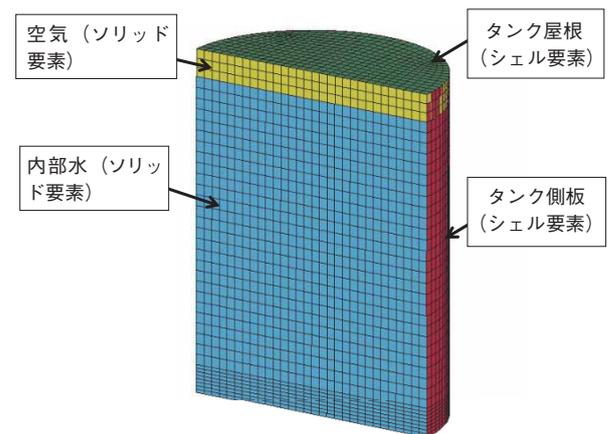


図10 大型タンク試験体の解析モデル

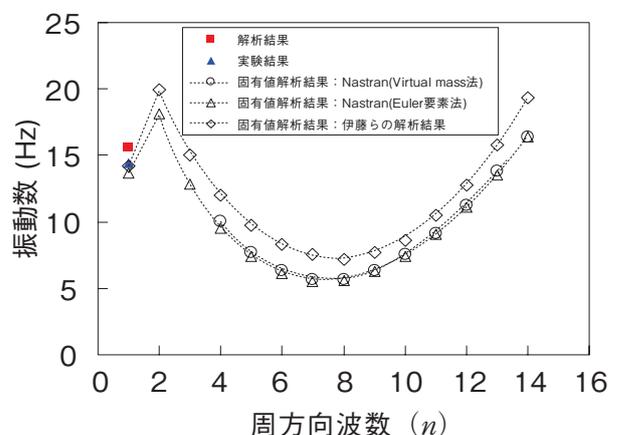


図11 固有振動数の比較(軸方向半波数 $m = 1$ の場合)

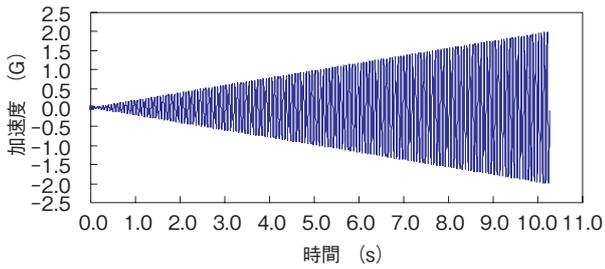


図12 解析に使用した入力波形

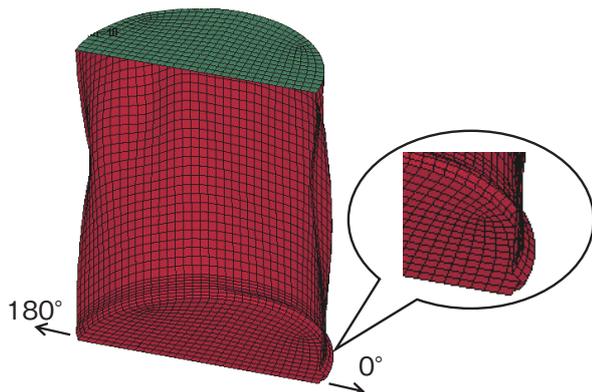


図13 解析結果：加振開始6秒後の変形図（内部の流体要素は非表示，変形倍率10倍）

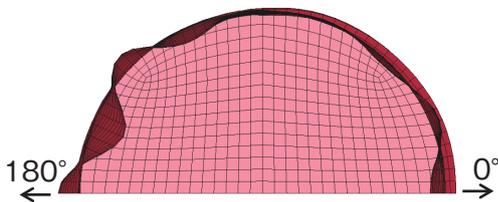


図14 解析結果：加振開始6秒後の変形図（上方からの鳥瞰図，変形倍率10倍）

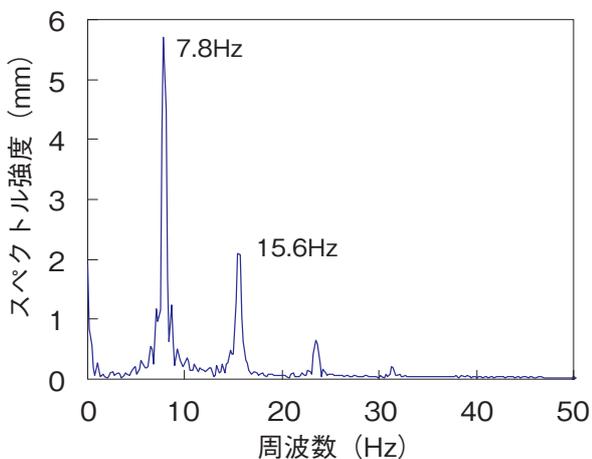


図15 側面変位（0°方向，高さ2420mm）の時刻歴に対する周波数分析結果

つまり非線形オーバル振動が発生していることがわかる。象脚座屈および非線形オーバル振動の発生は伊藤らの実験^(21,42,43,45)でも報告されており，解析結果は，伊藤らの実験結果とよく一致していると言える。

本解析は入力に正弦波を用いており，実験では特別に作成した模擬地震波を使用していることから，定量的な比較はできていない。しかしながら，座屈モードや非線形オーバル振動の発生を含む振動挙動について解析結果は実験結果と一致することから，提案する動的座屈解析手法は，実験を高精度にシミュレーションできると考えられる。

以上のように，形状や寸法の異なる2種類のタンク試験体について解析結果と実験結果とを比較した。この結果から，提案する手法は地震時の実機タンクの応答を高精度にシミュレーションできる可能性があると結論付けられる。さらに，提案する手法を用いて数値解析実験を行い，タンクの耐震安全裕度等の耐震性能を評価することは十分に可能と考えられる。

7. 結言

新しい動的座屈解析手法を提案し，形状および寸法の異なる2種類の円筒形貯水タンク試験体の動的座屈挙動を解析した。解析結果は実験結果と一致し，提案する手法が実機タンクの地震時の座屈挙動を高精度にシミュレーションできる可能性があることが示された。提案する手法を用いることで，例えば，柏崎刈羽原子力発電所で発生した円筒形貯水タンクの異なる座屈モード発生の原因解明などに活用できると考えられる。本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 幾何学的非線形性を考慮できるシェル要素によるタンク構造体の3次元モデル化とオイラー方程式に従うソリッド要素による内部水のモデル化を行い，さらに構造体と内部水との流体構造連成を考慮した動的座屈解析手法を提案した。
- (2) 提案した手法は，座屈モードだけでなく，非線形オーバル振動の発生も解析することができ，地震時におけるタンクの実現象を高精度にシミュレーションできると考えられる。
- (3) 提案する手法を数値解析実験に活用することができると考えられ，各種のタンクについて，耐震安全裕度といった耐震性能を評価するひとつの方

法になり得ると考えられる。

文献

- (1) 経済産業省 原子力安全・保安院, “柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年新潟県中越沖地震による被災状況等の現地調査結果報告,” 第 51 回原子力安全委員会資料, 資料第 1-2 号, (2007).
- (2) IAEA, “Preliminary Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP,” IAEA Report, (2007).
- (3) 東京電力, “新潟県中越沖地震の概要と運営管理・設備健全性への影響について,” 日本機械学会 2007 年度年次大会緊急フォーラム資料, (2007).
- (4) 朝日新聞科学医療グループ, 「震度 6 強」が原発を襲った, 朝日新聞社, (2007).
- (5) 木村逸郎, “東京電力柏崎刈羽原子力発電所を襲った新潟県中越沖地震の被害と今後の対応,” 原子力 eye, Vol.53, No.11, pp.24-27 (2007).
- (6) IAEA, “Follow-up IAEA Mission in Relation to the Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP,” IAEA Latest Report, (2008).
- (7) 中村政雄, “柏崎の教訓を世界へ—耐震安全性国際シンポジウムから—,” エネルギーレビュー, 2008-6, pp.38-42 (2008).
- (8) 野本敏治, “中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会の検討状況,” 原子力発電所の耐震安全性・信頼性に関する国際シンポジウム講演資料, 日本原子力技術協会ホームページ, available from http://www.jaif.or.jp/pdf/2008_06_Nomoto_ja.pdf, (accessed 2008-5-30).
- (9) Housner, G. W., “Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers,” Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.47, No.9, pp.15-35 (1957).
- (10) Veletsos, A. S. and Yang, J. Y., “Dynamics of Fixed-Base Liquid-Storage Tanks,” Proceedings of U.S.-Japan Seminar for Earthquake Engineering Research with Emphasis on Life-line Systems, pp.317-341, (1976).
- (11) Fischer, D., “Dynamic Fluid Effects in Liquid-Filled Flexible Cylindrical Tanks,” Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.7, pp.587-601 (1979).
- (12) Fischer, D. F. and Rammerstorfer, F. G., “The Stability of Liquid-Filled Cylindrical Shells under Dynamic Loading,” Buckling of shells, E. Ramm, ed., Springer-Verlag, New York, pp. 569-597 (1982).
- (13) 藤田勝久, “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.46, No. 410, pp.1225-1234 (1980).
- (14) 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).
- (15) 秋山宏, 高橋誠, 橋本伸一, “曲げせん断荷重を受ける鋼製円筒殻の座屈実験,” 日本建築学会構造系論文報告集, No.371, pp.40-51 (1987).
- (16) 秋山宏, 高橋誠, 野村聡, “内圧と曲げせん断荷重をうける鋼製円筒殻の座屈実験,” 日本建築学会構造系論文報告集, No.400, pp.113-122 (1989).
- (17) Akiyama, H., Seismic Resistance of Fast Breeder Reactor Components Influenced by Buckling, Kajima Institute Publishing, (1997).
- (18) 日本建築学会, 容器構造設計指針・同解説, (1996).
- (19) 高圧ガス保安協会, 高圧ガス設備等耐震設計指針, (1997).
- (20) 神奈川県防災局工業保安課, 高圧ガス施設等耐震設計基準, (2002).
- (21) 伊藤智博他, “平底円筒形貯水タンクの地震時座屈挙動の検討 (第 1 報, 象脚座屈現象における液体圧の影響),” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.70, No.693, pp.1309-1317 (2004).
- (22) 前川晃, 鈴木道明, 清水泰貴, 藤田勝久, “振動試験による円筒形貯水タンクの耐震性評価 (第 2 報) —曲げ振動とオーバル振動との連成効果—,” INSS JOURNAL, Vol.12, pp.128-138 (2005).
- (23) 前川晃, 鈴木道明, 藤田勝久, “振動試験による円筒形貯水タンクの耐震性評価 (第 3 報) —大入力加振時の非線形振動応答と発生メカニズムの考察—,” INSS JOURNAL, Vol. 13, pp. 78-89 (2006).

- (24) Maekawa, A., Fujita, K. and Suzuki, M., "Seismic Response Reduction Caused by Coupling between Beam-Type and Oval-Type Vibrations of a Cylindrical Water Storage Tank under Large Excitation," Proceedings of 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2007-26465, pp.1-8 (2007).
- (25) 前川晃, 鈴木道明, 藤田勝久, "円筒形貯水タンクの曲げ振動とオーバル振動との連成に関する有限要素法の併用による等価モデル," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.74, No.737, pp.8-15 (2008).
- (26) 前川晃, 藤田勝久, 佐々木亨, "振動試験による円筒形貯水タンクの耐震性評価 (第4報) — 動的座屈実験および静的弾塑性座屈解析による評価 —," INSS JOURNAL, Vol.14, pp.76-85 (2007).
- (27) Maekawa, A., Fujita, K. and Sasaki, T., "Dynamic Buckling Test of Modified 1/10 Scale Model of Cylindrical Water Storage Tank," Proceedings of 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2007-26466, pp. 1-10 (2007).
- (28) Maekawa, A. and Fujita, K., "Explicit Non-linear Dynamic Analysis of Cylindrical Water Storage Tanks Concerning Coupled Vibration between Fluid and Structure," Proceedings of 2008 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2008-61112, pp.1-9 (2008).
- (29) Belytschko, T, Lin, J. I. and Tsay, C. S., "Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.42, pp.225-251 (1984).
- (30) 藤田勝久他, "地震時における円筒容器の動的座屈シミュレーション技術の開発," 三菱重工技報, Vol.28, No.3, pp.1-6 (1991).
- (31) 松浦真一他, "軸対称要素を用いた動的座屈解析コードの開発 — (その1) 静的弾塑性座屈解析コードの開発 —," 電力中央研究所報告, 研究報告: U91060, (1992).
- (32) 松浦真一, 萩原豊, 酒井理哉, 中村秀治, "軸対称要素を用いた動的座屈解析コードの開発 — (その2) 流体連成動的弾塑性座屈解析コードの開発 —," 電力中央研究所報告, 研究報告: U93067, (1994).
- (33) 豊田幸宏, 松浦真一, "FBR 垂直隔壁の地震時流体連成座屈評価 (その1) — 薄肉円筒模型の動的座屈試験による流体連成動的座屈解析法の精度検証 —," 電力中央研究所報告, 研究報告: U96044, (1997).
- (34) 豊田幸宏, 松浦真一, "FBR 垂直隔壁の地震時流体連成座屈評価 (その2) — 多重円筒殻の流体連成動的座屈評価法の開発と適用性検証 —," 電力中央研究所報告, 研究報告: U97056, (1998).
- (35) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格, (2007).
- (36) LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 970, Livermore Software technology Corporation, Livermore, (2003).
- (37) MSC. Nastran 2005 Quick Reference Guide, MSC. Software Corporation, Santa Ana, (2005).
- (38) 高圧ガス保安協会, "鋼製平底円筒形貯槽の耐震実験報告 (第1回)," 高圧ガス, Vol.21, No.7, pp.363-373 (1984).
- (39) 高圧ガス保安協会, "鋼製平底円筒形貯槽の耐震実験報告 (第2回)," 高圧ガス, Vol.21, No.8, pp.440-452 (1984).
- (40) 高圧ガス保安協会, "鋼製平底円筒形貯槽の耐震実験報告 (第3回)," 高圧ガス, Vol.21, No.9, pp.512-529 (1984).
- (41) Tazuke, H. et al., "Seismic Proving Test of Equipment and Structures in Thermal Conventional Power Plant," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.124, pp.133-143 (2002).
- (42) Ito, T et al., "Investigation on Buckling Behavior of Cylindrical Liquid Storage Tanks under Seismic Excitation (1st Report; Investigation on Elephant Foot Bulge)," Proceedings of 2003 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol. 466, pp.193-201 (2003).
- (43) Morita, H. et al., "Investigation on Buckling Behavior of Cylindrical Liquid Storage Tanks under Seismic Excitation (2nd Report- Investigation on the Nonlinear Ovaling Vibration at the Upper Wall)," Proceedings of 2003ASME Pressure Vessels and Piping Con-

- ference, PVP-Vol.466, pp.227-234 (2003).
- (44) Sugiyama, A. et al., "Investigation on Buckling Behavior of Cylindrical Liquid Storage Tanks under Seismic Excitation (3rd Report ; Proposed Design Procedure Considering Dynamic Response Reduction)," Proceedings of 2003 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol.466, pp.235-242 (2003).
- (45) 伊藤智博他, "平底円筒形貯水タンクの地震時座屈挙動の検討 (第2報, 上部胴での非線形オーバル振動現象)," 日本機械学会論文集 (C編), Vol.70, No.695, pp.9-17 (2004).