

# 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 —

Evaluation of Seismic Characteristics of Cylindrical Water Storage Tank  
by Vibration Test (4th Report)  
— Dynamic Buckling Experiment and Static Elastic-Plastic Buckling Analysis —

前川 晃 (Akira Maekawa) \*<sup>1</sup> 藤田 勝久 (Katsuhisa Fujita) \*<sup>2</sup> 佐々木 亨 (Toru Sasaki) \*<sup>3</sup>

**要約** 本論文では、原子力発電所などで使用されている大型の縦置き円筒形貯水タンクの約1/10縮尺モデルを用いて、振動台による動的な座屈実験を実施した結果と有限要素法を用いた座屈解析の結果を報告する。動的座屈実験は、予め、初期不整量を測定した円筒形タンク試験体を用いて実施した。タンク試験体は95%水位まで水を満たし、入力波として正弦波を用いた。オーバル振動が引き起こすタンク試験体の応答低減に対抗して座屈させるために、上部に200kgの重錘を載荷して加振することで座屈が発生し、タンク側面に塑性変形が生じた。座屈解析は、有限要素法による静的弾塑性座屈解析を行った。静的解析の場合、流体と構造物との連成を考慮できないため、動液圧分布の扱いが課題とされている。本研究では、Fischerによって提案されている単純な動液圧分布を与えて座屈荷重を解析し、実験値とほぼ一致する結果を得た。これより、提案する静的座屈解析手法の有効性を確認した。

**キーワード** 原子力発電所, 円筒形貯水タンク, 耐震設計, 振動試験, 動的座屈, 動液圧分布, 数値解析, 有限要素法, 静的弾塑性座屈解析, 弧長増分法

**Abstract** This study reports on the dynamic buckling experiment of a 1/10 reduced scale model of a large-scale cylindrical water storage tank by using a shaking table, and the buckling analysis by using the finite element method. The dynamic buckling experiment is performed by using the reduced scale tank model whose initial imperfection has been measured. The tank model is filled up to 95% with water and then 200kg of weight is put on top, overcoming the response reduction induced by the oval-type vibration. The sinusoidal waves are used as the input. As a result of the experiment, the buckling occurs on the tank and plastic deformation is observed on the side and bottom of the tank. The static elastic-plastic buckling analysis with the finite element method is conducted. There is an issue of how to treat the dynamic fluid pressure distribution of the contained water in the tank with regard to the static buckling analysis because the coupling between fluid and structure cannot be taken into consideration. In this study, the distribution of the dynamic fluid pressure is calculated in accordance with the Fischer's method. The buckling load calculated by using the dynamic fluid pressure distribution almost perfectly agrees with that of the experiment. Therefore, it is appropriate to apply this proposed static elastic-plastic buckling analytical method to seismic design.

**Keywords** nuclear power plant, cylindrical water storage tank, seismic design, vibration test, dynamic buckling, dynamic fluid pressure distribution, numerical analysis, finite element method, static elastic-plastic buckling analysis, arc-length method

## 1. 緒言

最近、新潟県中越地震<sup>(1)~(4)</sup>、宮城県沖地震<sup>(5)~(6)</sup>および能登半島地震<sup>(7)~(8)</sup>といった大きな地震が原子力発電所の近くで発生し、原子力発電所の耐震性に

対する関心が高まっています。このような社会状況の中で、1995年の兵庫県南部地震を契機として見直し作業<sup>(9)</sup>が進められていた発電用原子炉施設に適用される耐震設計審査指針の改訂が、2006年9月に原子力安全委員会により決定<sup>(10)~(12)</sup>された。構

\* 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

\* 3 カワサキプラントシステムズ(株)

造物や機器の耐震設計に対する要求はますます厳しいものとなり、従来よりも大きな地震に対する耐震安全性の確保<sup>(13)</sup>が求められることとなった。さらに、確率論的耐震安全性評価（地震 PSA）の実施<sup>(14)~(18)</sup>が求められるようになったことから、地震時の機器の終局状態の挙動評価手法の確立も必要となった。

円筒形貯水タンクは原子力発電所において液体貯蔵容器として用いられ、耐震上、重要な機器として設計を行うことが要求<sup>(19)</sup>されている。設計では地震時の座屈強度評価が重要な評価項目である。座屈後の終局状態において、タンクは大変形を生じ、非線形な挙動を示す。したがって、座屈や終局状態の挙動を精度よく評価するために、非線形性を考慮した耐震安全性評価手法が不可欠である。耐震設計審査指針の改訂により、このような評価手法の確立が急務となった。

現行の設計<sup>(19)~(22)</sup>は、静的座屈実験や解析から得られた静的座屈評価式を用いるとともに構造物は線形挙動をすると仮定して評価が行われている。しかしながら、これらの評価式は、タンク内部水による動的な液圧の効果を考慮した場合の妥当性検証が必ずしも十分でない指摘<sup>(23)</sup>されている。

近年、有限要素法（FEM）による大変形解析が発達し、静的座屈実験結果を精度良く評価することが可能となってきている。しかしながら、座屈挙動に対する動的効果や動的効果に基づく流体・構造連成効果が未だ明確ではない<sup>(24)</sup>ため、地震のような動的効果を考慮した座屈解析手法の精度は必ずしも十分とは言えない。過去に、貯水タンク試験体を動的に座屈させる実験を行い、実験結果を FEM で模擬する研究<sup>(25)~(28)</sup>が行われている。しかしながら、これらの研究では動的座屈実験結果を精度良く評価するには至っていない。現在のところ、流体を内包した貯水タンクの座屈挙動に対する数値解析評価手法は一般的に確立しているとは言い難い。

したがって、さらに数多くの円筒形貯水タンクの動的座屈実験を行い、動的座屈と静的座屈の挙動の差異を明らかにするとともに、動的座屈挙動を高精度で評価できる座屈解析手法を確立していく必要がある。このような手法は、将来の耐震安全性評価手法になくなくてはならないものである。

本研究では、大型の円筒形貯水タンクを模擬したタンク試験体を用いて、動的座屈実験を実施した結果と FEM を用いた座屈解析の結果を報告する。本

研究の目的は、タンクの動的効果に基づいて生じる流体と構造物との連成を考慮した座屈強度解析手法の確立に資することである。

まず、大入力正弦波加振によるタンク試験体の座屈実験を行った。タンク試験体の座屈は、オーバル振動の応答低減効果<sup>(29)</sup>を考慮して、頂部に重錘を載せて応答を増加させることにより行った。

次に、FEM による静的な弾塑性座屈解析を行い、座屈荷重を評価した。FEM を用いた貯水タンクの静的座屈解析では、流体と構造物との連成を考慮できないため、動液圧分布の扱い方が重要とされている。この動液圧分布の設定条件について検討を行い、FEM による静的な弾塑性座屈解析手法の一つとして動液圧の効果を考慮した手法を提案する。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

動的座屈実験に用いる実験装置は、油圧式大型振動台と計測装置を備えた振動台実験装置を使用した。使用した振動台実験装置の仕様を表 1 に示す。

表 1 振動台実験装置の仕様

	項目	仕様
振動台	最大積載量	35ton
	振動台寸法	4.5m × 4.5m
	加振方式	電気油圧サーボ方式
	加振方向	3軸同時加振（6自由度）
	最大変位	水平±100mm, 鉛直±67mm
	最大加速度	水平 3.0G, 鉛直 2.0G
	加振振動数範囲	0 ~ 50Hz
計測システム	アナログ/デジタル変換器	128ch
	動ひずみアンプ	96ch
	チャージアンプ	32ch
	計測周波数範囲	0 ~ 10kHz

### 2.2 タンク試験体

実験に使用したタンク試験体の写真を図 1 に示す。原子力発電所に設置されている燃料取替用水タンクや復水タンクのような縦長の大型縦置き円筒形貯水タンクの約 1/10 の縮尺モデルとなるように製作したタンク試験体を用いた。図 1 に示すタンク試験体は既報<sup>(30)~(32)</sup>で用いた試験体と同じ形状であるが、頂部に円盤型の重錘を載せている。加振時に重錘が振

動台へ落下しないように、実験建屋の天井とロープで繋いでいる。座屈による試験体の損傷から漏水する恐れがあるので、タンク試験体の周りにはビニールシートで囲っている。タンク試験体左側の架台は変位計を固定するために使用した。

図2はタンク試験体の形状および寸法を示す。タンク試験体は円筒部分をアルミ合金で製作し、円筒部分の上下部は鋼製のフランジで固定した。タンク試験体を座屈させるに十分な応答が得られるように、タンク試験体の上部には200kgの円盤型の重錘を載せた。また、タンク試験体と振動台との間に鋼製の計測用架台を設置した。

図3にタンク試験体の各種計測センサーによる計測位置を示す。タンク試験体の頂部と振動台に加速度計を設置した。タンク試験体の頂部には剛なフランジがあり、オーバル振動の影響は小さいため、測定値は主に曲げ振動の挙動になる。胴部の高さ700mmの位置で、周方向 $-18^\circ$ から $138^\circ$ の範囲に $6^\circ$ 毎に、ひずみゲージを貼り付け、オーバル振動の挙動を測定した。タンク内部に圧力センサーを設置し、



図1 タンク試験体（重錘付き）の写真

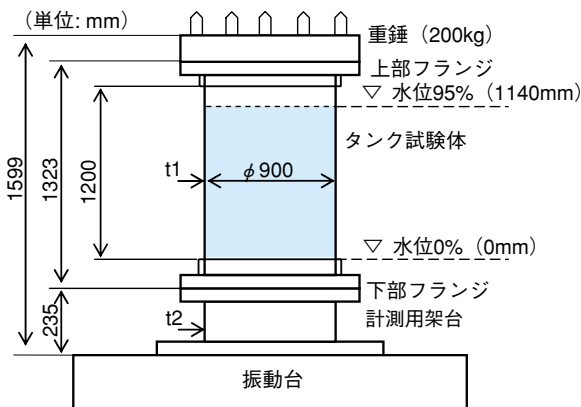


図2 重錘付きタンク試験体の形状および寸法

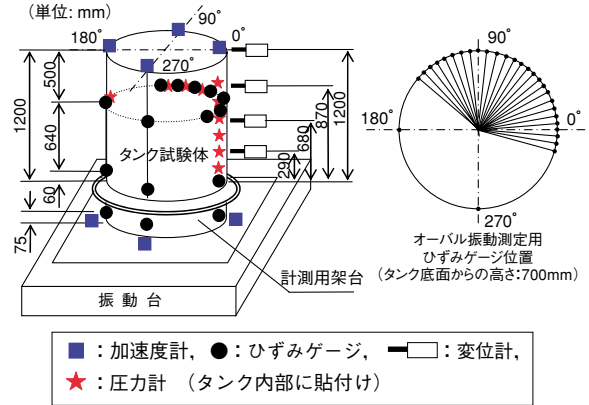


図3 計測センサーによる計測位置

動液圧を測定した。タンク壁面に静水圧が加わった状態をゼロとして、 $0^\circ$ 位置における高さ方向および円周方向の動液圧を測定した。高さ200mmの他に400mmから1100mmの間に100mm間隔で計9箇所の圧力を測定した。円周方向には高さ700mmで、 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ$ および $135^\circ$ 位置の計7箇所の圧力を測定した。変位計は非接触式のレーザ変位計を使用した。図3に示すように $0^\circ$ 方向の高さ方向に4箇所に設置し、タンク頂部とタンク側面の振動による振幅変位を測定した。

座屈荷重は、加振時に計測用架台に発生するひずみを利用して求めた。計測用架台の高さ75mmの $90^\circ$ と $270^\circ$ の位置に3軸ロゼットひずみゲージを貼り付け、 $0^\circ$ と $180^\circ$ の位置には単軸ひずみゲージを貼り付け、加振時に発生するひずみを測定した。測定したひずみから、せん断ひずみと曲げひずみを求め、校正試験により定めた換算式を用いて、タンク試験体に発生するせん断力と曲げモーメントを算定した。校正試験として加振試験の前に静荷重試験を行い、タンク試験体の上部フランジに加えた静荷重と計測架台で測定したひずみとの関係を求めることにより、せん断ひずみとせん断力との関係および曲げひずみと曲げモーメントとの関係を表す換算式を求めた。

### 2.3 実験方法

95%水位(1140mm)まで水を満たしたタンク試験体を振動台に設置して、正弦波定常加振を行った。加振は水平方向のみとし、 $0^\circ$ と $180^\circ$ との間で加振を行った。図4に示すように、前後を漸増、漸減とした正弦波を入力波として用いた。予備試験として正弦波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次の曲げ振動の固有振動数を

表2 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

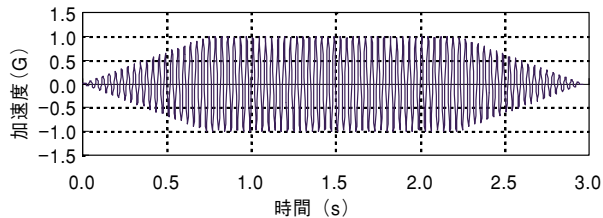


図4 入力に使用した時刻歴波形の例

測定したところ 27Hz であったので、加振振動数を 27Hz とした。

表2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。

## 2.4 座屈解析

静的弾塑性座屈解析により座屈荷重を評価する。上述したように、現状では、流体を内包した貯水タンクの座屈挙動を評価する数値解析手法は一般的に確立したものがない。特に貯水タンク特有の荷重である動液圧の与え方が明確になっていない。本研究では、実験結果を基に、解析条件として与える適切な動液圧分布を検討する。後述するが、検討した結果、高さ方向の動液圧分布は Fischer の方法<sup>(33)</sup>により算出し、円周方向の動液圧は  $\cos \theta$  分布とした。この条件を用いて有限要素法 (FEM) による静的弾塑性解析を行い、座屈荷重を評価した。解析コードは ABAQUS ver.6.5-6<sup>(34)</sup> を用い、荷重増分に弧長増分法を用いた座屈解析を実施した。

## 3. 結果

### 3.1 動的座屈実験結果

表2に示した3回目の加振後に、タンク側面に目視で塑性変形が見られたことから、座屈したと判断し試験を終了した。座屈後の試験体全体の写真を図5に示す。タンク側板真ん中に大きな変形(図6に拡大図を示す。)が見られ、タンク試験体下部にも変形(図7に拡大図を示す。)が見られた。これらの変



図5 座屈後のタンク試験体 (270°側)



図6 タンク試験体側面の変形 (270°側)



図7 タンク試験体下部の変形 (0°側)

形から判断して、タンク試験体は曲げ座屈とせん断座屈とが重畳した可能性がある。

図8にタンク試験体の応答と入力加速度との関係を示す。図の上段はタンク頂部の最大応答加速度との関係を示し、中段は最大せん断力との関係を、下

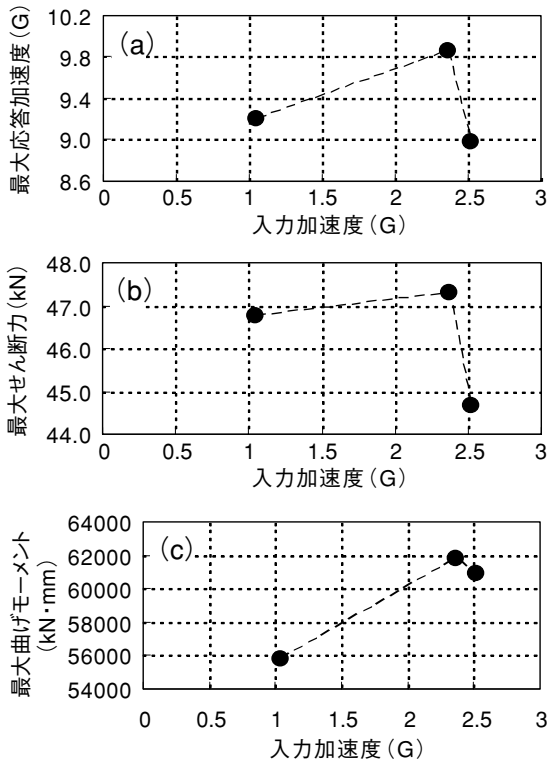


図8 タンク試験体の応答と入力加速度との関係  
(a)最大応答加速度, (b)最大せん断力, (c)最大曲げモーメント

段は最大曲げモーメントとの関係を示す。これらの図において、タンク試験体の耐力は2回目の加振時に最大となり、3回目の加振で耐力の低下が見られることをから、2回目の加振時に座屈したと考えられる。このときの最大せん断荷重である47.3kNを座屈荷重とする。

### 3.2 FEM 解析条件のための動液圧分布の考察

FEMによる静的な弾塑性座屈解析を行い、貯水タンクの座屈荷重を評価する際に、上述したように流体と構造体との連成を考慮できないため、タンクの内部水とタンク側板との間で生じる動液圧の大きさや分布形状の取り扱い方が重要となる。この動液圧分布の設定条件について検討した。

動液圧分布の測定値をもとに、後述するFEM解析の入力条件とするために簡単な動液圧分布形状に近似することを考えた。タンクの振動は曲げ振動とオーバル振動とに分類できると考えられるが、この中で動液圧分布に最も影響を与えるのは、曲げ振動である。Veletsos<sup>(35)</sup>やFischer<sup>(33)</sup>は1次の曲げ振動の振動モードのみに着目して、高さ方向の動液圧分

布を $\sin \theta$ や $\cos \theta$ で表すことを提案している。また、藤田<sup>(36)</sup>やFischer<sup>(33)</sup>は、円筒部の振動に伴い発生する動液圧を、剛体モード成分、バルジングモード成分およびスロッシングモード成分に分けて求め、これらの動液圧成分の重ね合わせにより、実際の動液圧分布を表わすことを提案している。そこで、Fischerの提案する方法<sup>(33)</sup>の適用を検討した。

図9に高さ方向の動液圧分布の測定値とFischerの方法により求めた動液圧分布を示す。動液圧分布は最大値で正規化している。座屈荷重は座屈直前までの動液圧の挙動に支配されると考えられることから、座屈前の状態である1回目の加振時における動液圧の測定値を用いて考察する。図には、代表的な測定値として、1回目の加振時の0.3secと0.7secの値を示す。Fischerの方法は、バルジングモード成分として、1次の曲げ振動の振動モードを利用して表わした三つの関数を提案しており、この三つの関数の違いにより、動液圧分布は異なる三つの分布形状を表す。また、Fischerの方法は三つの関数のうち、使用者の判断により適切な関数を使うように提案している。図中に、三つの関数を用いて計算した動液圧分布を示す。図9の説明文中の関数 $f(\xi)$ (ここで $\xi$ は液面高さに対する任意高さの比である。)はFischerの提案する三つの関数内で使用される1次の曲げ振動モードを表す関数であり、三つの関数を識別するために記載している。Fischerの提案する三つの関数の間では、この1次の曲げ振動の振動モードを表す関数のみが異なる。Fischerは1次の曲げ振動モードとして、次に示す三つの簡単な関数を提案している：(1) $f(\xi) = \sin[(\pi/2) \cdot \xi]$ 、(2) $f(\xi) = \xi$ 、(3) $f(\xi) = 1 - \cos[(\pi/2) \cdot \xi]$ 。図9をもとに、Fischerの方法の適用性を検討し、最適な関数を選択した。図9に示す測定値との比較からFischerの方法は解析の動液圧分布として適用できると判断した。また、三つの関数のうち、1次の曲げ振動モードに、(1)の式： $f(\xi) = \sin[(\pi/2) \cdot \xi]$ を用いる関数が適切と判断した。

次に、円周方向の動液圧分布について検討した。図10に円周方向の動液圧分布の測定値と $\cos \theta$ 分布を示す。代表的な測定値として、1回目の加振時の0.3secと0.7secの値を示す。オーバル振動はタンク側面に花びら状に振動することから、局所的な動液圧変動を引き起こすが、全体で見るとその影響は無視できると考えられる。したがって、 $\cos \theta$ 分布で近似しても差し支えないと考えられる。

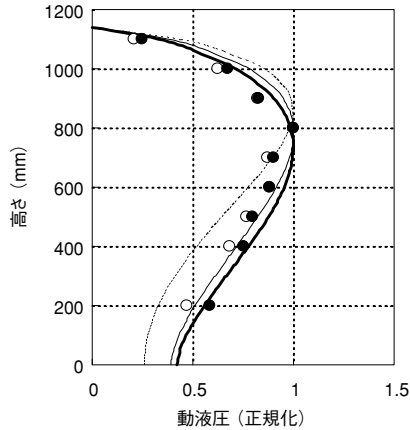


図9 高さ方向の動液圧分布に関する測定値（1回目の加振時）と Fischer の方法による計算値との比較，測定値：加振開始から 0.3sec 後；●，加振開始から 0.7sec 後；○，計算値（関数  $f(\xi)$  は 1 次の曲げ振動モードを表す。）：

$$\left[ \begin{array}{ll} (1)f(\xi) = \sin[(\pi/2) \cdot \xi] & ; \text{---} \\ (2)f(\xi) = \xi & ; \text{- - -} \\ (3)f(\xi) = 1 - \cos[(\pi/2) \cdot \xi] & ; \text{· · ·} \end{array} \right]$$

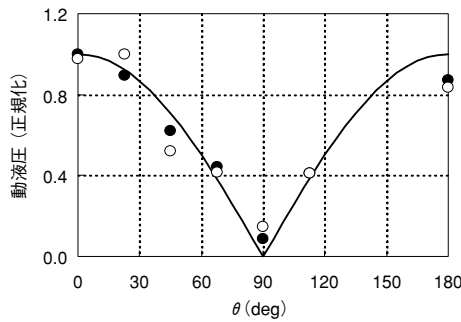


図10 円周方向の動液圧分布に関する測定値（1回目の加振時）と Fischer の方法による計算値との比較，測定値：加振開始から 0.3sec 後；●，加振開始から 0.7sec 後；○，計算値（関数  $f(\theta)$  は動液圧の大きさを表す。）： $f(\theta) = \cos \theta$ ；—

### 3.3 FEM による静的弾塑性座屈解析

解析対象は、図2で示した計測用架台および重錘を含んだタンク試験体とした。要素数は13045、節点数は52275である。タンク試験体および計測架台は8節点の薄肉シェル要素（S8R5）とし、200kgの重錘は質量要素として解析モデル上部の円筒中央部に配置した。使用した材料定数を表3に示す。試験体胴部のアルミ合金の応力ひずみ線図は実験前に材料試験を行い求めた。モデルは、この結果を用いた弾塑性モデルとしている。使用した解析モデルを図11に示す。

解析に用いた形状初期不整は、実験前に計測した

表3 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 <sup>3</sup> )
アルミ合金 (A5052) (試験体胴部)	ヤング率 (MPa)	69420	0.33	2680
	ポアソン比			
スチール (その他の部材)	ヤング率 (MPa)	203000	0.3	7800
	ポアソン比			

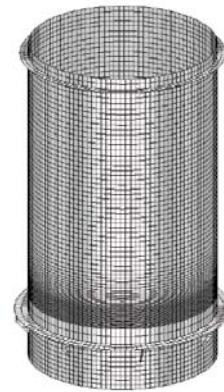


図11 FEM 解析に用いた解析モデル

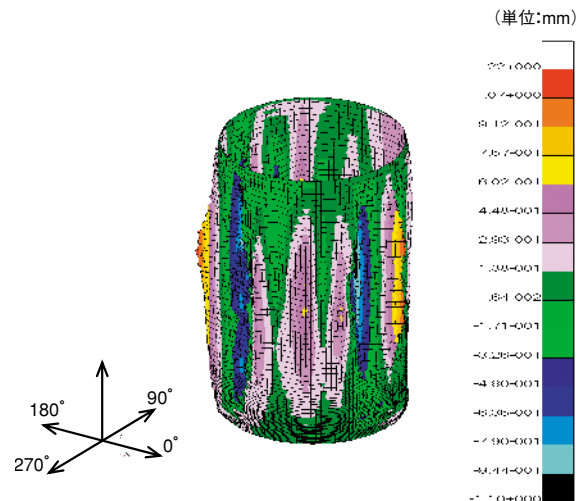


図12 初期不整量の分布図

形状計測結果を基に定めた。形状測定は光学式の機器<sup>(37)</sup>を用いて断面ピッチ10mm、ピッチ角度2°で全周測定を行った。確度は約0.3mmである。解析でタンク試験体胴部に与えた初期不整形を図12に示す。図に示すように、不整量は板厚1mmに対して1mm以上になる箇所もある。

動液圧の大きさおよび分布は、3.2で検討したよ

うに、高さ方向は Fischer の方法を用いる。本解析では 1 次の曲げ振動モードに (1) の式： $f(\xi) = \sin[(\pi/2) \cdot \xi]$  を用いた関数で表される動液圧分布を用いる。円周方向は  $\cos \theta$  分布とする。解析モデルの応答加速度分布は、 $f(\xi) = \sin[(\pi/2) \cdot H]$  (ここで  $H$  は円筒高さに対する任意高さの比である。) で与えた。これは、汎用 FEM コードの NASTRAN によるモード解析結果を参考にして決めた。過去の振動実験結果を参考にして、試験体頂部の応答倍率を 25 とした。静的解析であるため、応答倍率で入力値の割り増しを行う。

座屈解析は、汎用 FEM コードの ABAQUS ver. 6.5-6<sup>(34)</sup> を使用した。最初に、自重と静水圧による静止時のつり合い計算を行い、次に水および構造物の慣性力をモデルに与えた。水の慣性力は動液圧として、構造物の慣性力は加速度として与えた。座屈解析では接線剛性が負となる時があるため、増分解析は弧長増分法 (ABAQUS コードでは RIKS 法という) を用いた。荷重は 180° 方向から 0° 方向に向かって载荷した。

上記のように、初期不整形形状以外は、設計データとして与えることができるように、初期条件を与えて座屈解析を行った。これらの条件をまとめると表 4 のとおりとなる。

解析結果を図 13 に示す。図は、変形図およびミーゼス応力分布図を示す。解析は図中の (a) から (f) の

表 4 解析条件

解析条件	単位	入力値
振動台の 1G あたりの試験体頂部加速度	G/G	25.0
高さ方向加速度分布	-	$\sin[(\pi/2) \cdot H]$
振動台の 1G あたりの動液圧最大値	kPa/G	87.6
高さ方向動液圧分布	-	1 次の曲げ振動モードに $\sin[(\pi/2) \cdot \xi]$ を用いた Fischer の方法に基づく関数
円周方向動液圧分布	-	$\cos \theta$

順に進んだ。解析初期 ((a) から (c)) において、解析モデルの背面 (180°) に変形が生じた。この変形は塑性変形を伴ったが、実験ではタンク試験体の 180° 側に目視での塑性変形は確認できなかった。また、モデル下部の 0° 側にわずかな変形が生じた。このように解析では変形が発生しているが、この期間に、解析モデルの耐力低下はなかった。(d) において解析モデル円筒部の 270° 側の中央部に変形が発生し進展した。さらに、モデル下部の 0° 側の変形も進展を始めた。(e) でベースシアが最大となり、以降、耐力が低下した。これは、解析モデルが座屈し、耐力の低下が起こったことを示す。この時、モデル円筒部の中央部および下部の変形部に塑性ひずみが発生した。これらの塑性変形は、実験結果の塑性変形位置とよく一致している。(f) ではベースシアが低下

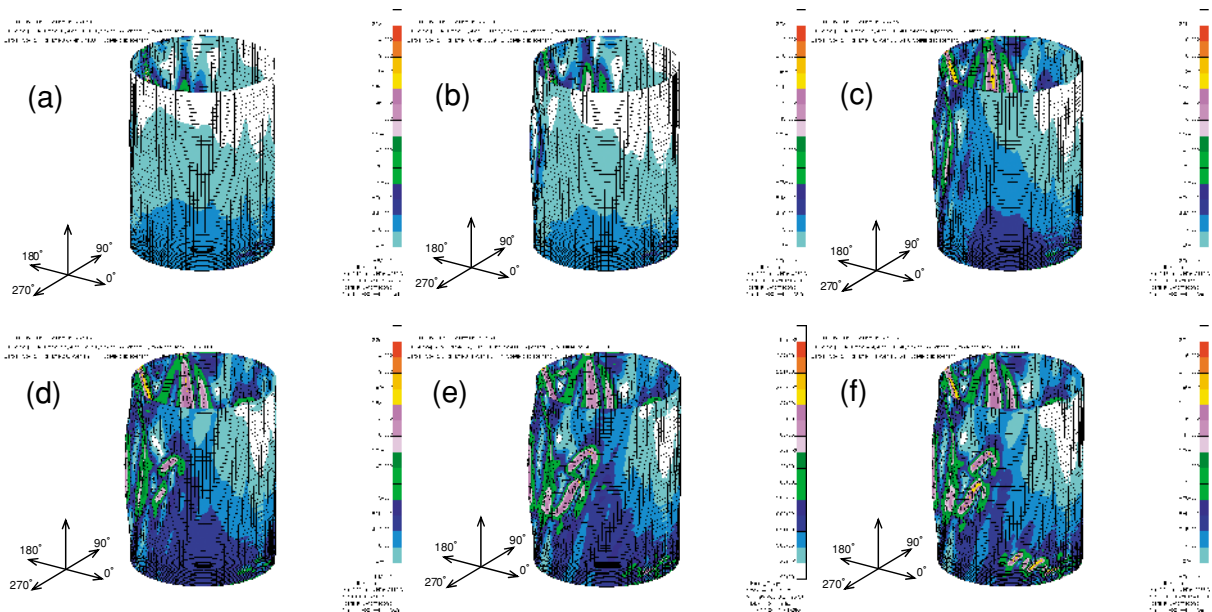


図 13 座屈解析結果：変形図 (変形量；5 倍に拡大) およびミーゼス応力分布図 (ベースシア：(a) 30.2kN, (b) 31.7kN, (c) 37.7kN, (d) 39.9kN, (e) 41.9kN, (f) 40.2kN)

表5 解析結果と実験値との比較

項目	解析値	実験値
座屈荷重(kN)	41.9	47.3
座屈変位(mm)	2.69	3.31

したにもかかわらず、解析モデル円筒部の中央部と下部の塑性変形が進展した。これは、座屈後の変形が進展していることを示す。

表5に座屈荷重および座屈変位を示す。解析では、荷重は解析モデル下部におけるベースシアから求め、変位は解析モデル頂部で代表させている。解析値は最大ベースシアを座屈荷重とし、その時の変位を座屈変位とした。実験値は加振時の最大値を座屈荷重および座屈変位とした。解析による座屈荷重は、実験値47.3kNに対して41.9kNとなり、若干低めではあるが、実用上、ほぼ一致したと見なせる範囲である。

以上の結果から、表4に示す解析条件を与えれば、静的弾塑性座屈解析により動的座屈挙動における座屈荷重を求めることができることがわかった。特に、動液圧分布として、Fischerの方法に従って設定した関数を用いれば、十分に妥当な座屈荷重を見積もることができることがわかった。したがって、本研究で示す解析条件を用いたFEMによる静的弾塑性座屈解析は貯水タンクの座屈評価に適用可能と考えられる。このように、本研究により、FEMを用いた貯水タンクの座屈強度評価手法の一つとして動液圧の効果を考慮した手法を提案することができた。本解析手法は、実機タンクの耐震性評価について、設計ベースではなく、実機タンクの個々の仕様や経年化を反映した実力ベースの評価を行うことができると考えられる。

#### 4. 結言

本研究では、頂部に200kgの重錘を載せた円筒形貯水タンク試験体を用いて動的座屈実験を行った。実験より得られた結果をFEMによる静的弾塑性座屈解析で評価するための実用的な手法を検討した。本研究により以下のことがわかった。

- (1) 動的座屈挙動を評価するために、FEMを用いた静的座屈解析を用いる場合、入力条件として与える動液圧は、高さ方向の分布として1次の曲げ振動により発生する動液圧分布のみを与え

ればよく、円周方向は $\cos \theta$ 分布を与えれば、十分な精度で解析できる。

- (2) FEMを用いた静的弾塑性座屈解析による座屈解析の手法の一つとして、動液圧の効果を考慮した手法を提案した。この手法で解析した座屈荷重値は実験結果とほぼ一致し、この手法が貯水タンクの座屈評価に適用可能であることを示すことができた。
- (3) 本研究で提案した解析手法は、実機タンクの耐震性評価について、設計ベースではなく、実機タンクの個々の仕様や経年化を反映した実力ベースの評価を行うことができると考えられる。

#### 謝辞

本研究の動的座屈実験は、石川島播磨重工業(株)の耐震実験場を利用した。振動台操作で協力いただいた、石川島播磨検査計測(株)の岩船正明氏と片岡威氏に謝意を表す。また、実験の実施にあたってカワサキプラントシステムズ(株)の鈴木道明氏から有益な助言をいただいた。この場を借りて謝意を表す。

#### 文献

- (1) 久田嘉章, “2004年新潟県中越地震—地盤と地震被害—,” 日本建築学会第32回地盤震動シンポジウム, pp.21-32 (2005).
- (2) 地学団体研究会新潟支部新潟県中越地震調査団編, “2004年新潟県中越地震—中越地震の被害と地盤—,” 地学団体研究会 (2005).
- (3) Nagasawa, K., Mizutani, H. and Sugawara, M., “The Mid Niigata Earthquake and Aseismic Design of Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station,” Proceedings of 13th International Conference on Engineering, ICONE13-50651, (2005).
- (4) 敦賀隆史他, “2004年新潟県中越地震と柏崎刈羽原子力発電所の耐震設計,” 平成17年度火力原子力発電大会論文集 (CD-ROM), (2005).
- (5) 小笠原英雄, “宮城県沖地震と原子力発電所の地震リスク,” Energy, pp.25-27 (2005).
- (6) 東北電力, “女川原子力発電所における宮城県沖の地震時に取得されたデータの分析・評価および耐震安全性評価に係る報告について,” 原子力安全基準・指針専門部会耐震設計審査指針



- 検討分科会第32回会合資料, 参考資料第1号 (2005).
- (7) 京都大学防災研究所地震予知研究センター, “2007年能登半島地震に伴う地殻変動,” 第172回地震予知連絡会資料 (2007).
- (8) 北陸電力, “「平成19年能登半島地震」に対する当社の対応について,” 北陸電力ホームページ, ([http://www.rikuden.co.jp/index\\_noto.html](http://www.rikuden.co.jp/index_noto.html)).
- (9) Shibata, H., “Modeling of Earthquake Motions for Seismic Design of Critical Facilities: Revision of Licensing Criteria of NPP,” *Journal of Pressure Vessels Technology*, Vol.128, pp.486-501 (2006).
- (10) 平野光将, “原子力発電所の耐震設計審査を強化へ,” *原子力 eye*, pp.46-57 (2006).
- (11) 平野光将, “新しい耐震指針の考え方—基準地震動の策定方法と高度化—,” *エネルギーレビュー*, pp.7-12 (2006).
- (12) 瀬戸一, “基準地震動  $S_s$  について (地震動研究者の立場から),” *NISA・JNES2006 シンポジウム講演資料*, pp.33-41 (2006).
- (13) 森下日出喜, “電気事業者の今後の対応—既設発電所の安全評価, 自主的に実践—,” *エネルギーレビュー*, pp.16-19 (2006).
- (14) 防災科学技術研究所, “構造物の地震損傷度評価手法の検討,” *防災科学技術研究所資料*, No. 237 (2003).
- (15) 杉野英治, 伊藤裕人, 鬼沢邦雄, 鈴木雅秀, “地震動の不確かさを考慮した経年配管の構造信頼性評価手法の開発,” *日本原子力学会和文論文誌*, Vol.4, No. 4, pp.233-241 (2005).
- (16) 蛭沢勝三, “地震 PSA 手法について,” 第11回性能目標検討分科会配布資料, 性能分第11-1-1号 (2006).
- (17) 蛭沢勝三, “軽水炉の確率論的安全評価 (PSA) 入門 第6回 地震 PSA,” *日本原子力学会誌*, Vol.48, No. 9, pp.676-683 (2006).
- (18) 大竹政和, “「残余のリスク」への留意求める—確率論的安全評価に期待—,” *エネルギーレビュー*, pp.13-15 (2006).
- (19) 日本電気協会, *原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG 4601-1987)*, (1987).
- (20) 日本建築学会, *容器構造設計指針・同解説*, (1996).
- (21) 高圧ガス保安協会, *高圧ガス設備等耐震設計指針*, (1997).
- (22) 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).
- (23) 伊藤智博他, “平底円筒形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流体圧の影響),” *日本機械学会論文集 (C編)*, 70巻, 693号, pp.1309-1317 (2004).
- (24) 藤田勝久, 伊藤智博, 和田宏, “地震動を受ける円筒殻の座屈に関する実験的考察 (第2報, せん断荷重による弾性座屈における流体連成の影響),” *日本機械学会論文集 (C編)*, 56巻, 525号, pp.1101-1106 (1990).
- (25) 伊藤智博他, “地震下における円筒殻の動的座屈解析 (第1報, 理論検討と初期不整の影響評価),” *日本機械学会論文集 (C編)*, 58巻, 552号, pp.2411-2416 (1992).
- (26) 豊田幸宏, 松浦真一, 増子芳夫, “流体連成動的座屈解析プログラムの開発とその検証,” *構造工学論文集*, Vol.43B, pp.31-40 (1997).
- (27) 田附英幸, 山口悟, 桜井朋樹, 石田和雄, “高レベル地震に対する円筒タンクの非線形挙動の確認試験と解析,” *石川島播磨技報*, Vol.39, No. 5, pp.292-300 (1999).
- (28) Morita, H. et al., “Assessment Procedure for Buckling of Thin Walled in Nuclear Power Plants under Seismic Loading (1st Report: Investigation on Elephant Foot Bulge),” *Proceedings of SMiRT 17*, K14-3, pp.1-8 (2003).
- (29) Maekawa, A. and Fujita, K., “Coupling between Beam-Type Vibration and Oval-Type Vibration of a Cylindrical Water Storage Tank,” *Fluid Structure Interaction and Moving Boundary Problems IV*, S.K. Chakrabarti and C.A. Brebbia, eds., WIT Press, Southampton, pp.121-130 (2007).
- (30) 前川晃, 清水泰貴, 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—動液圧分布の入力加速度依存性について—,” *INSS JOURNAL*, Vol.11, p.117 (2004).
- (31) 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, p.128 (2005).

- (32) 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, p.78 (2006).
- (33) 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).
- (34) ABAQUS Inc., ABAQUS Ver. 6. 5 Analysis User’s Manual (2004).
- (35) Veletsos, A.S. and Yang, J.Y., “Dynamics of Fixed-Base Liquid-Storage Tanks,” U.S. -Japan Seminar for Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems, pp.317-341 (1976).
- (36) 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), 47巻, 413号, pp.20-29 (1981).
- (37) 神尾信行, “自動車部品に活用する非接触形状計測技術,” 機械と工具, Vol.48, No. 12 (2004).