

称号及び氏名 博士（工学） 前川 晃

学位授与の日付 2007年9月20日

論文名 「液体貯蔵円筒容器の振動特性と耐震性評価に関する研究」

論文審査委員 主査 教授 伊藤 智博

副査 教授 杉村 延広

副査 教授 三村 耕司

## 論文要旨

最近、新潟県中越地震、宮城県沖地震および能登半島地震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ますます高まっている。このような社会状況の中で、発電用原子力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された。これにより、原子力発電所を構成する各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が求められるようになった。さらに、確率論的耐震安全性評価（地震PSA）の実施が求められるようになったことから、機器の地震時の挙動を高精度に評価する技術も必要となってきた。

液体貯蔵円筒容器は、原子力発電所においてプラント運転上必要な冷却水の貯蔵用容器として用いられ、耐震重要度の高い機器として設計を行うことが要求されている。耐震性評価は、日本電気協会による「原子力発電所耐震設計技術指針」に基づいて行われるが、このような現行の耐震性評価手法は、円筒容器の曲げ振動を主体とした評価体系であり、ほぼ満水状態の液体貯蔵円筒容器において、曲げ振動の他に、振動が大きくなると円筒容器側板に励振され、花びら形に振動するオーバル振動の影響は考慮されていない。したがって、オーバル振動が円筒容器の振動特性や耐震性に与える影響を明らかにし、耐震設計へオーバル振動を考慮する必要性が従来から指摘されている。しかしながら、オーバル振動が円筒容器構造体と内部水との流体・構造連成に起因して発生することやオーバル振動の振動挙動が非線形性を持つことから、オーバル振動に対する研究は学術的範囲に留まっている。有限要素法のような数値解析技術が耐震性評価手法として実用化されているが、オーバル振動を扱うには流体・構造連成解析技術および非線形動的構造解析技術を必要とすることから、オーバル振動を扱える数値解析手法は未だ確立されていない。

さらに、液体貯蔵円筒容器の設計では、地震時の座屈強度評価が重要な評価項目である。座屈を起こすと、液体貯蔵円筒容器は急速にその耐力が低下する。座屈後の終局状態において、液体貯蔵円筒容器は大変形を生じ、非線形な弾塑性挙動を示す。したがって、弾塑性挙動までを考慮

した耐震安全性評価手法が不可欠である。現行の設計は、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共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、液体貯蔵円筒容器の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されている。過去に、液体貯蔵円筒容器を模擬した試験体を用いて動的に座屈させる実験を行い、実験結果を数値解析技術によりシミュレーションする研究が行われている。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シミュレーションするには至っていない。現在、液体貯蔵円筒容器の動的座屈挙動に対する数値解析技術の確立が強く望まれているところである。

以上のように、従来の耐震設計では容器は線形挙動を示すものとし、座屈等の非線形挙動は許容していない。しかしながら、近年の大地震に鑑み、弾塑性挙動まで考慮した合理的な耐震性評価技術の開発が強く要求されている。本論文は、原子力発電所の燃料取替用水タンクや復水タンクに代表される耐震重要度の高い大型の液体貯蔵円筒容器を対象として、それらの地震時の動的な非線形挙動の解明とそれを考慮した新しい耐震性評価技術の開発を目的として行った研究成果をまとめたものである。本論文は7つの章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、液体貯蔵円筒容器の地震時の被害状況を示すとともに、動的挙動や耐震性に関する従来研究の概要を述べ、続いて本研究の目的および本論文の概要について述べた。

第2章では、原子力発電所の燃料取替用水タンクや復水タンクのような大型の縦置き液体貯蔵円筒容器を対象とし、それを模擬した縮尺比約 1/10 の円筒容器試験体を用いて振動実験を行い、流体・構造連成振動に起因する容器の振動特性や内部水による動液圧特性について検討した。地震荷重に関係する高さ方向の動液圧分布について、共振振動数領域での正弦波加振や地震波加振の実験値は、現行の耐震性評価手法による解析値と異なる分布を示すことを明確にした。現行の耐震性評価手法には、Housner 理論や速度ポテンシャル理論、有限要素法を用いた評価手法があるが、上述の差異を生じる要因として、容器側面で花びら状に振動するオーバル振動の影響を考慮していないためと推測された。そこで、これらの評価手法の妥当性を検討した。その結果、動液圧分布については、現行評価法による解析値は実測値と異なるにもかかわらず、耐震性評価上重要なせん断力や曲げモーメントは実測値とほぼ一致することを確認した。すなわち、オーバル振動の発生により動液圧分布に差が生じても、それは耐震性評価を支配するせん断力や曲げモーメントに与える影響は少ないことを確認した。

第3章では、大入力加振時のオーバル振動の影響を調べた。円筒容器試験体を用いて大入力のスイープ試験を行った結果、円筒容器試験体の曲げ振動とオーバル振動とが連成し、入力加速度の増加に伴い曲げ振動の共振振動数が低振動数側へ移行し、応答倍率が低下するという非線形振動応答を示すことを明らかにした。また、1/2 次の分数調波となるオーバル振動が大振幅を伴って大きく成長することを明らかにした。この非線形振動応答を、オーバル振動による幾何学的非線形性の発生の観点から検討し、非線形振動応答の発生原因は大振幅オーバル振動による円筒容器側板の面外変形に起因した曲げ剛性の低下であることを明らかにした。この考えを基に、オーバル振動の振幅に依存して変化する非線形ばねを持つ等価な非線形 1 自由度系モデルを提案した。

第4章では、円筒容器試験体を用いた正弦波加振試験および地震波加振試験を行ったその結果、入力加速度が大きくなると、最大応答が入力に比例しない応答低減現象が生じることを確認した。この応答低減が発生すると同時に、容器側板に 1/2 次の分数調波となるオーバル振動が大振幅で発生することから、応答低減現象の原因は、正弦波スイープ試験時と同様に、曲げ振動とオーバル振動との連成によるものであることを明確にした。また、第3章で提案した非線形 1 自由度系モデルを用いた振動応答シミュレーションにより、応答低減の原因が大振幅オーバル振動による幾何学的非線形性によるものであることを示した。この非線形 1 自由度系モデルを用いて、非線形オーバル振動を耐震設計合理化につなげる手法について検討した。この手法によると、実機換算で 570Gal の地震時に 16%程度のオーバル振動による応答低減が見込まれ、オーバル振動の適切な考慮により、耐震裕度は増加し設計合理化を図り得ることを明らかにした。

第5章では、円筒容器試験体の非線形振動応答について、有限要素法による直接積分法でシミュレーションする手法について検討した。円筒容器試験体の構造体部を Lagrange 要素である Belytschko-Lin-Tsay シェル要素でモデル化し、流体部を Euler 方程式に従うソリッド要素でモデル化し、流体と構造との連成解析に ALE カップリングを用いた。解法は中央差分を用いる陽解法を利用して時刻歴応答を求めた。提案する有限要素法による解析手法は、円筒容器側板に発生する非線形オーバル振動の振動挙動および内部水の動液圧挙動を高精度で再現し、また、大入力の振動実験で確認された、曲げ振動とオーバル振動との連成によって生じる非線形振動応答による応答低減効果を再現できた。これらの結果から、提案する有限要素法による解析手法は、液体貯蔵円筒容器の非線形振動挙動についても高精度でシミュレーションし得る有用な手法であることを明確にした。

第6章では、円筒容器試験体を用いた動的座屈実験を実施した。実験結果との比較から、既往の座屈設計指針に記載されている簡易評価手法の妥当性を評価した。また、有限要素法を用いた強い流体・構造連成振動を伴う座屈解析手法について検討した。簡易評価手法は、実プラントで使用されている液体貯蔵円筒容器のようにある程度の初期不整をもつ円筒容器の座屈荷重に対しても、十分に保守的評価を与えることを明確にした。有限要素法による弾塑性座屈解析手法では、静的手法と動的手法を検討した。静的弾塑性座屈解析手法では、流体・構造連成の結果生じる高さ方向の動液圧分布を1次の曲げ振動により生じる動液圧分布とし、周方向分布を  $\cos\theta$  分布とすることにより、十分な精度で座屈荷重を評価できることを示した。強い流体・構造連成振動を伴う動的弾塑性座屈解析手法は、未だ確立された手法がないが、第5章で提案した陽解法と ALE カップリングを用いる解析手法を座屈解析へ適用した。その結果、解析は実験で生じた円筒下部の座屈モードを高精度で模擬できることを明らかにした。これらの結果から、提案する有限要素法を用いた弾塑性座屈解析手法は液体貯蔵円筒容器の耐震性評価手法として有効な手法であることを明らかにした。

第7章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題について述べた。

## 審査結果の要旨

本論文は、原子力発電所の燃料取替用水タンクに代表される耐震重要度の高い大型の液体貯蔵円筒容器を対象として、その地震時の動的非線形挙動の解明とそれを考慮した新しい耐震性評価技術の開発を目的として行った研究であり、以下のような成果を得ている。

- 1) 液体貯蔵円筒容器を模擬した試験体を用いた振動実験により、流体・構造連成振動に起因する容器の振動特性や内部水の動液圧特性を明確にしており、容器胴部に生じる非線形オーバル振動の影響により、現行評価法による動液圧分布と実験で得られた分布には乖離が生じることを示している。
- 2) 円筒容器試験体を用いた大入力の振動試験により、大入力の場合には円筒容器の曲げ振動とオーバル振動が連成し、入力加速度の増加に伴い曲げ振動の共振振動数が低振動数側へ移行し、応答倍率が低下するという非線形振動応答を示すことを明確にしている。また、この非線形振動応答の発生原因は、1/2 次の分数調波となる非線形オーバル振動が大振幅となり、円筒容器側板の面外大変形が生じ、それに起因した曲げ剛性の低下であることを明らかにしている。さらに、この考えを基に、非線形オーバル振動の振幅に依存する非線形ばねを持つ等価な非線形1自由度系モデルを提案し、数値シミュレーションにより、応答低減の原因が幾何学的非線形性によるものであることを確認すると共に、非線形オーバル振動の適切な考慮により、設計合理化を図り得ることを明確にしている。
- 3) 有限要素法による、動的非線形挙動の数値シミュレーション手法を提案し、この手法は、非線形オーバル振動および容器の応答低減効果を高精度で解析できることを明確にしてい

る。また、動的座屈実験により、動的座屈現象を明確にすると共に、有限要素法による、強い流体・構造連成振動を伴う座屈解析手法として、2種類の手法を提案し、これらの解析手法が、動的座屈現象を高精度で解析できることを明らかにしている。

以上の他にも、本論文では多くの新しい知見を得ており、これらの諸成果は、大型の液体貯蔵円筒容器の耐震設計に対して多くの知見を与えているのみならず、新しい耐震設計審査指針に対応可能な耐震設計手法の確立に寄与するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを示したものである。

本委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士（工学）の学位を、授与することを適当と認める。