

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 -

Evaluation of Seismic Characteristics of Cylindrical Water Storage Tank by Vibration Test (3rd Report) - Nonlinear Vibration Response in Large Input Excitation and Consideration for its Generation Mechanism -

前川 晃 (Akira Maekawa)*¹ 鈴木 道明 (Michiaki Suzuki)*² 藤田 勝久 (Katsuhisa Fujita)*¹

要約 耐震性の高い設計が要求されている原子力発電所の大型円筒形貯水タンクにおいて、タンク側面に発生するオーバル振動の挙動解明は未だ十分とは言えない。本研究は、曲げ振動とオーバル振動とが連成した時に生じる円筒形貯水タンクの非線形な振動応答の解明を目的として実験と解析を行ったものである。まず、円筒形タンク試験体を用いた、大入力の正弦波スイープ加振実験を行った。その結果、曲げ振動とオーバル振動とが連成すると、タンクの共振振動数が低振動数側へ移動し、応答倍率が低下するという非線形振動応答が認められた。さらに、試験結果を詳細に分析すると、大入力加振時にはオーバル振動の振幅を大きな面外変形と考えることができ、この面外変形がタンクの曲げ剛性を低下させる幾何学的非線形性となることが明らかとなった。最後に、この幾何学的非線形性に着目して、オーバル振動の振幅に依存して変化するばねを持つという等価な非線形1自由度系モデルを提案した。このモデルを用いた数値シミュレーションは、振動実験結果を説明できることがわかった。

キーワード 原子力発電所, 円筒形貯水タンク, 非線形振動, 連成振動, 曲げ振動, オーバル振動, 曲げ剛性, 共振振動数, 応答倍率

Abstract As for the safer seismic-proof design of large-scale cylindrical water storage tanks in a nuclear power plant, it is not enough to understand the coupling behavior between the beam-type and the oval-type vibrations of the tank. The purpose of this study is to investigate the nonlinear vibration response of the tank when the beam-type and the oval-type vibrations are coupled. First, the frequency sweep tests with a cylindrical test tank are performed. The results of the tests demonstrate that the resonance frequency shifts to the lower frequency region and the magnification factor is smaller when the beam-type and the oval-type vibrations are coupled with the large input acceleration, and that the oval-type vibration has the significant out-of-plane deformation of the tank sidewall. Its out-of-plane deformation, which means the amplitude of the oval-type vibration, is found to decrease the flexural rigidity of the tank. Next, considering such geometrical nonlinearity, a model with the nonlinear equivalent single degree of freedom system having the spring constant dependent on the amplitude of the oval-type vibration is proposed. The numerical simulation using this model can explain the results of the vibration test very well.

Keywords nuclear power plant, cylindrical water storage tank, nonlinear vibration, coupled vibration, beam-type vibration, oval-type vibration, flexural rigidity, resonance frequency, magnification factor

1. 緒言

最近、日本では地震活動が活発化⁽¹⁾⁽²⁾していると言われており、日本各地で大きな地震の発生とその地震による被害^{(3)~(5)}が相次いでいる。このような状況で、原子力安全委員会 原子力安全基準・指針専門

部会 耐震指針検討分科会において、発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針の改定案⁽⁶⁾が、2006年8月にまとめられた。改定された内容をいくつか挙げると、原子力発電所周辺の活断層の調査範囲については、過去5万年までであったものを12万~13万年前まで遡ることとしている。さらに、活断層が

*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 現在 カワサキプラントシステムズ(株)

近くにない場合には、全国一律にしてきた直下地震の大きさを過去の地震データや岩盤の特性などを考慮して発電所毎に評価することとしており、耐震評価用の模擬地震となる基準地震動が従来よりも大きくなると予想される。したがって、さらなる耐震安全性の研究が必要⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾となってきた。

耐震設計において、設計対象物の詳細な動的挙動を把握できれば、耐震性能をより実態に即して評価することが可能となり、耐震安全性の向上に非常に役立つ。過去に、原子力発電所の構造物や機器・配管系について、多くの耐震性能評価試験⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁷⁾が行われ、数多くの知見が得られてきた。しかしながら、地震によって励起される構造物や機器・配管系の振動挙動は複雑であり、未だ研究すべき点は多い。

原子力発電所において、高い耐震性能を要求されている機器の一つに円筒形貯水タンクがある。これは内部に液体を貯蔵するという機能から、化学プラントや火力発電所においてもよく見られる機器である。最近では、大型化が進み、半径/板厚比が大きい形状のものが多い。側板が薄肉構造を持つ大型の円筒形貯水タンクは、地震時に内部の保有水とタンク側板との間で流体-構造連成振動が生じやすくなる。その振動モードは、内部の保有水の振動が主体となるスロッシングやタンク構造体の振動が主体となるバルジングがあり、バルジングはさらに、タンク全体があたかも梁のように振動する曲げ振動とタンク壁面が花びら状に変形して振動するオーバル振動とに分けられる。

原子力発電所をはじめとした各産業施設に適用されている現行の耐震性評価方法⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁶⁾では円筒形貯水タンクの曲げ振動およびスロッシングによる応力等を評価する体系となっている。タンク側板に発生するオーバル振動は地震時の外力により励起されないとしているおり、オーバル振動の評価については明記されていない。しかしながら、過去に実施された円筒形貯水タンクの振動試験ではオーバル振動の発生が報告⁽²⁷⁾⁻⁽³²⁾されている。ほぼ満水状態の貯水タンクにおいては、曲げ振動と同時にオーバル振動も発生し、曲げ振動と連成してタンクの振動強度に影響する可能性がある。したがって、タンクの曲げ振動とオーバル振動とが連成した時のタンクの振動特性を明らかにする必要があると考えられる。しかも、オーバル振動がタンクの振動挙動や座屈挙動へ与える影響については十分に理解されておらず、今後の研究課題となっている。

著者らは、円筒形貯水タンク試験体を用いた振動試験を行い、大入力加振を行うと、タンクの振動応答が入力に比例して大きくならない応答低減挙動を示すことを既報で報告⁽³³⁾している。さらに、その要因について考察を行い、曲げ振動とオーバル振動との連成効果の可能性を指摘した。

そこで、大入力加振時に流体-構造連成によって貯水タンクに発生するオーバル振動とタンクの曲げ振動との連成効果を詳細に調べるため新たに振動実験を実施し、さらに、実験で観察された応答低減などの非線形な振動応答のメカニズムについて考察することにした。本報では既報⁽³³⁾に引き続いて、曲げ振動とオーバル振動とが連成した時の円筒形貯水タンクの振動応答について報告する。

まず、振動実験では、薄肉構造を持つ大型の円筒形貯水タンクの縮尺モデルを製作し、正弦波による大入力加振を行うことで、曲げ振動とオーバル振動とが連成した状態を再現した。本報では実施した振動実験のうち、正弦波スイープ試験を行い、加振振動数に対する振動特性の変化を調べた結果を報告する。小入力から大入力までの範囲の試験をいくつか実施することで、曲げ振動とオーバル振動との連成の度合いを変化させた。本報の目的の一つは、このような振動実験を行って、連成効果によるタンクの振動応答への影響を具体的に明らかにすることである。

次に、実験で観察された非線形な振動応答の発生メカニズムの考察として、オーバル振動の変位振幅によりタンク側板に発生する大きな面外変形に着目した。曲げ振動へ与えるオーバル振動の連成効果を面外変形に起因する幾何学的非線形性で説明しようとするのが、本報の一番の目的である。この面外変形の影響を調べるために、オーバル振動の振動モードの形状を面外変形としてタンクの側板に与えた円筒形タンクモデルを用いて、有限要素法(FEM: Finite Element Method)の静解析によるタンクの曲げ剛性の変化を調べた。

上記の解析結果を踏まえて、オーバル振動の変位振幅に曲げ剛性が依存するばね定数を持つという等価な非線形1自由度系振動モデルを作成した。モデルの検証として、正弦波スイープ試験のシミュレーションを行い、上記で述べた振動実験の結果と比較を行った。提案するモデルは振動実験の結果を模擬することができた。同時に本モデルについての今後の課題も把握した。

2. 実験

2.1 実験装置

振動実験で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	35 t
	振動台寸法	4.5 m × 4.5 m
	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 ± 100 mm, 鉛直 ± 67 mm
	最大加速度	水平 3.0 G, 鉛直 2.0 G
	加振振動数範囲	0 ~ 50 Hz
計測システム	アナログ/デジタル変換器	128 ch
	動ひずみアンプ	96 ch
	計測周波数範囲	0 ~ 10 kHz

2.2 タンク試験体

振動実験に使用したタンク試験体の写真を図1に、寸法を図2に示す。タンク試験体は既報^{(31)~(33)}で用いた試験体と同じ形状である。この試験体は、円筒部分はアルミ合金 (A 5052) 製である。円筒部分の上下部は炭素鋼 (SS 400) 製のフランジで固定し、上部フランジには内部が覗けるようにポリカーボネート製の天板を取り付けた。また、タンク試験体と振動台との間に架台を設置した構造とした。



図1 実験で使用したタンク試験体の写真

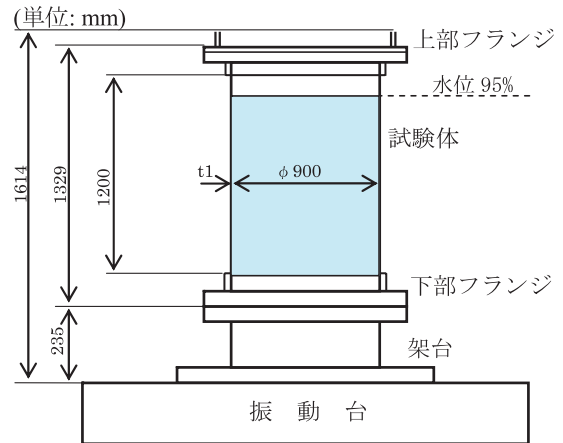
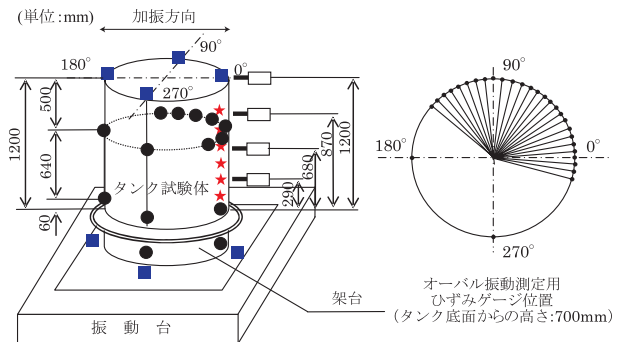


図2 タンク試験体の組立図



- : 加速度計, ●: ひずみゲージ, □: 変位計
- ★: 圧力センサー (内部に貼り付け)

図3 使用した計測センサーと計測位置

図3に振動試験における各種計測センサーとその計測位置を示す。タンク頂部と振動台に半導体式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ることから、タンク頂部の応答へのオーバル振動の影響は小さいため、タンク頂部の加速度測定値は主に曲げ振動の挙動になる。ひずみゲージを胴部の高さ700mmの位置で、周方向-18°から138°の範囲に6°毎に貼り付け、オーバル振動の変位振幅によって発生する周方向ひずみを測定した。タンク内部にひずみゲージ式の圧力センサーを設置し、動液圧を測定した。また、非接触式のレーザ変位計を図3に示すように0°位置の高さ方向に4ヶ所に設置し、タンク頂部とタンク側面における曲げ振動やオーバル振動による変位振幅を測定した。高さ1200mmの変位計は剛な上部フランジ部分の変位を測定するので、オーバル振動による影響は小さいことから、変位測定値は曲げ振動成分となる。他の高さの変位計は曲げ振動とオーバル振動との両方の成分を含む

ので、高さ 1200mm の変位測定値を用いて曲げ振動成分を除くことで、オーバル振動成分のみによる変位測定値を算出した。

2.3 実験方法

タンク試験体は、実機の貯水タンクの運用上の最大貯水量を基にして、95%水位 (1140mm) まで内部に水を満たした。実施した正弦波スイープ試験は水平方向のみの加振とした。試験の加振振動数範囲はタンク試験体の共振振動数を含む 5Hz から 49.5Hz とし、スイープ速度は 0.2Hz/s とした。入力加速度は表 2 に示すように小入力から大入力と変化させて計 11 の試験条件で実施した。小入力加振ではオーバル振動は大振幅とならないため、曲げ振動とオーバル振動とはほとんど連成していない状態のタンクの振動挙動になる。大入力加振ではオーバル振動は大振幅まで成長するので、曲げ振動とオーバル振動とが大きく連成した状態のタンクの振動挙動になる。

まず、タンク頂部と振動台とに設置した加速度計の測定値から振幅応答曲線と位相応答曲線を求め、卓越する振動数や応答倍率の変化を評価した。なお、本研究では、この卓越振動数を共振振動数と呼ぶ。次に、タンク試験体の胴部に設置した変位計やひずみゲージの測定値からオーバル振動の発生状況を評価した。

表 2 正弦波スイープ試験の試験条件一覧

試験ケース	入力加速度 (G)	加振振動数範囲 (Hz)	スイープ速度 (Hz/s)
1	0.09	5 Hz 49.5 Hz	0.2
2	0.09	49.5 Hz 5 Hz	0.2
3	0.11	5 Hz 49.5 Hz	0.2
4	0.11	49.5 Hz 5 Hz	0.2
5	0.21	5 Hz 49.5 Hz	0.2
6	0.21	49.5 Hz 5 Hz	0.2
7	0.54	5 Hz 49.5 Hz	0.2
8	0.55	49.5 Hz 5 Hz	0.2
9	1.16	5 Hz 49.5 Hz	0.2
10	1.56	5 Hz 49.5 Hz	0.2
11	0.11	5 Hz 49.5 Hz	0.2

3. 実験結果

3.1 円筒形タンク試験体の非線形振動応答

代表的な 3 つの試験ケース即ち、小入力加振の試験ケースとして表 2 のケース 1 を、中加振の試験ケースとして試験ケース 7 を、大加振のケースとして試験ケース 9 を取り上げる。

振動台の加速度と頂部の応答加速度とから求めた振幅応答曲線を図 5 に、位相応答曲線を図 6 に示す。図 5 の振幅応答曲線にはピークが見られるが、そのピークの振動数が共振振動数を示し、ピークの高さ

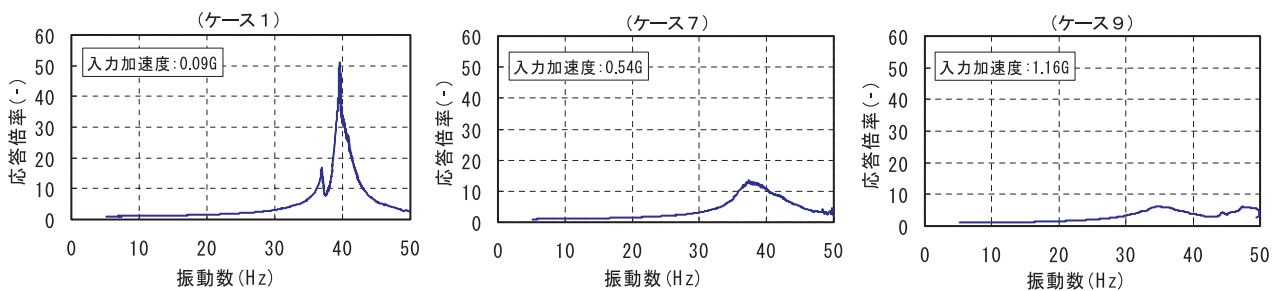


図 5 振動台加速度に対するタンク試験体頂部加速度の振幅応答曲線、掃引振動数範囲；5 Hz 49.5 Hz、スイープ速度；0.2Hz/s

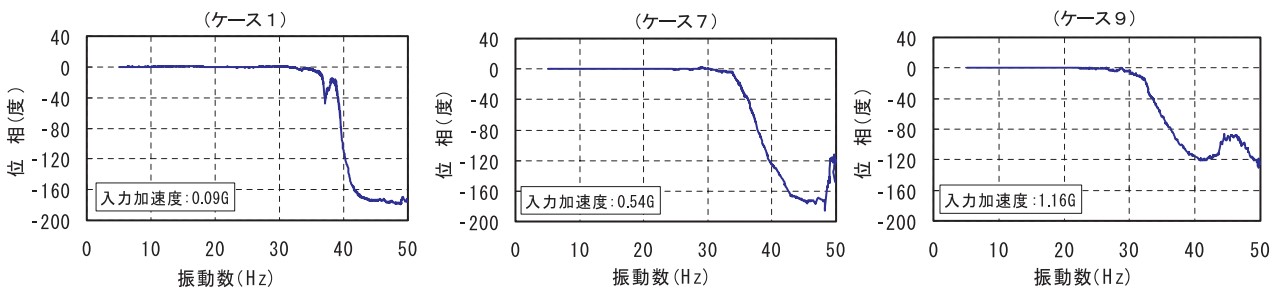


図 6 振動台加速度に対するタンク試験体頂部加速度の位相応答曲線、掃引振動数範囲；5 Hz 49.5 Hz、スイープ速度；0.2Hz/s

が応答倍率，つまり，入力に対する応答の大きさを示す．図6の位相応答曲線は加振振動数に対する応答の位相差を示す．図5から，入力加速度が大きくなるにしたがって，共振振動数が低振動数側へ移動することが確認できる．図5では，応答倍率も入力加速度の大きさが大きくなるにしたがって低下することがわかる．さらに，入力加速度を大きくしていくと，振幅応答曲線はなだらかな形状となり，共振点を示すピークはほとんど認められなくなり，応答倍率は非常に小さくなっている．共振振動数の低振動数側への移動は，振幅特性だけでなく位相特性からも確認できる．図6においても，位相差が90°となる振動数が入力加速度の大きさにしたがって低振動数側へ移動していることがわかる．

表2に示す全部の試験ケースについて，共振振動数と応答倍率の入力加速度に対する関係を図7と図8とにまとめた．タンク試験体の曲げ振動の共振振動数と応答倍率は，入力加速度の大きさに依存して非線形的に変化している．

3.2 オーバル振動の発生

0°位置で高さ680mmの位置の変位計で測定したオーバル振動の変位振幅の時刻歴波形を図9に示す．3.1

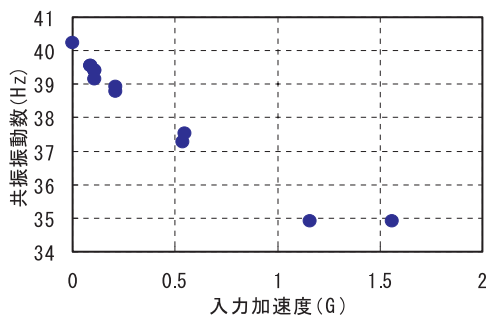


図7 タンク試験体の入力加速度と共振振動数との関係

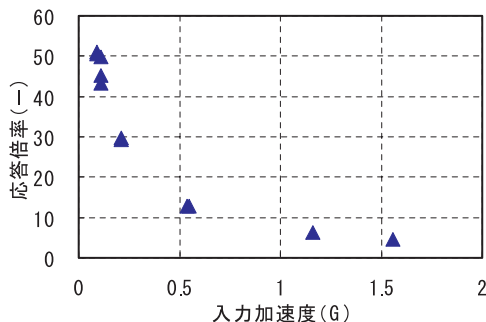


図8 タンク試験体の入力加速度と応答倍率との関係

と同様に，図の上から試験ケース1，7および9の測定結果を示している．測定結果は，試験体頂部の変位計の測定値を用いて曲げ振動成分を除くことで，オーバル振動成分のみを取り出している．図の横軸は加振振動数を表わしている．縦軸は，グラフのフルスケールが異なるが，オーバル振動の振幅を示す．三つの図を比較すると，共振振動数付近の35Hzから40Hzの範囲において，中入力加振のケース7や大入力加振のケース9のオーバル振動の振幅は試験体の半径450mm，板厚1mmに対して無視できないほど大きくなることわかる．言い換えれば，大入力加振時のタンク側板では，オーバル振動の振幅による面外変形が無視できないことを示す．

面外変形の大きさについて，タンク側板のオーバル振動による周方向ひずみの観点からも考察する．

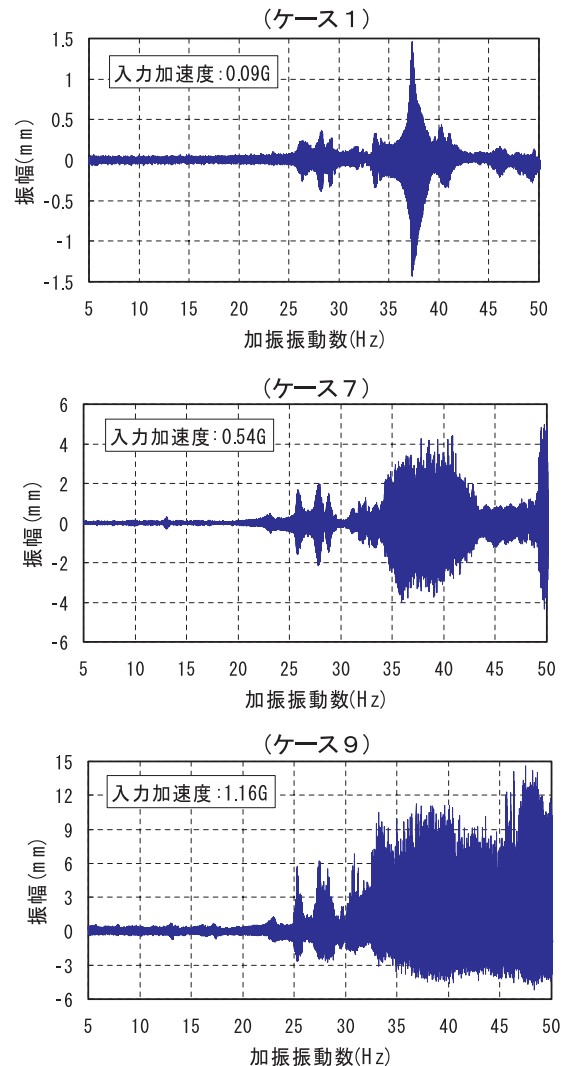


図9 オーバル振動の変位振幅の時刻歴波形 (高さ680mm)，掃引振動数範囲；5Hz～49.5Hz，スイープ速度；0.2Hz/s

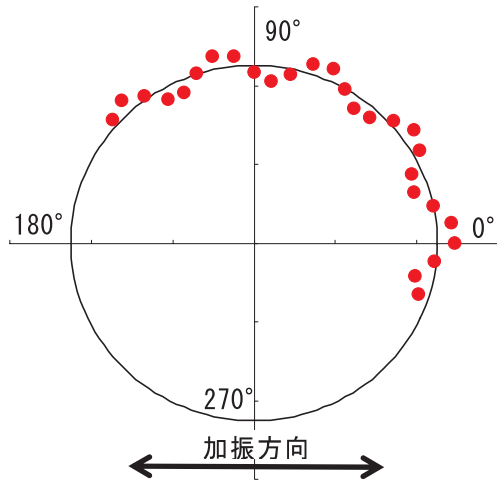


図10 オーバル振動発生時における周方向ひずみのひずみ分布の例

図10に、オーバル振動の発生によって生じるタンク側面の周方向ひずみ分布の例を示す。周方向ひずみは花びら状に分布しているが、オーバル振動が振動することによって、この周方向ひずみも振動する。図11に、スイープ試験の任意時刻にオーバル振動により発生した周方向ひずみの振幅の変化を示す。スイープ試験の結果から曲げ振動の共振振動数は35Hzから40Hzの間で変化したので、この範囲で異なる三つの加振振動数について調べた結果を示す。比較ケースは先ほどと同様に試験ケース1, 7および9である。入力加速度0.09Gの小入力加振では、ひずみ振幅はほとんど無視できる程度の大きさであることに對して、入力加速度0.54Gの中入力加振や入力加速度1.16Gの大入力加振では、入力加速度の増加率以上に大きくなっていることがわかる。オーバル振動が曲げ振動の共振振動数付近においても大きな振幅を持って振動しているという結果は、タンクが共振して曲げ振動を発生している時に、オーバル振動によるタンク側板の面外変形が無視できないほど大きくなり、タンクの振動応答を非線形にする影響を与えることになる。これを大変形効果または幾何学的非線形性という。振動実験で観察されたタンクの共振振動数や応答倍率についての非線形な振動応答は、このようなオーバル振動の振幅による幾何学的非線形性に起因するのではないかと考えられる。さらに考察した結果を次節で述べる。

以上の結果から、円筒形貯水タンクを大入力で加振した場合、オーバル振動の振幅は無視できないほど大きくなり、面外変形と見なせることと、面外変形に起因する幾何学的非線形性の発生の可能性があ

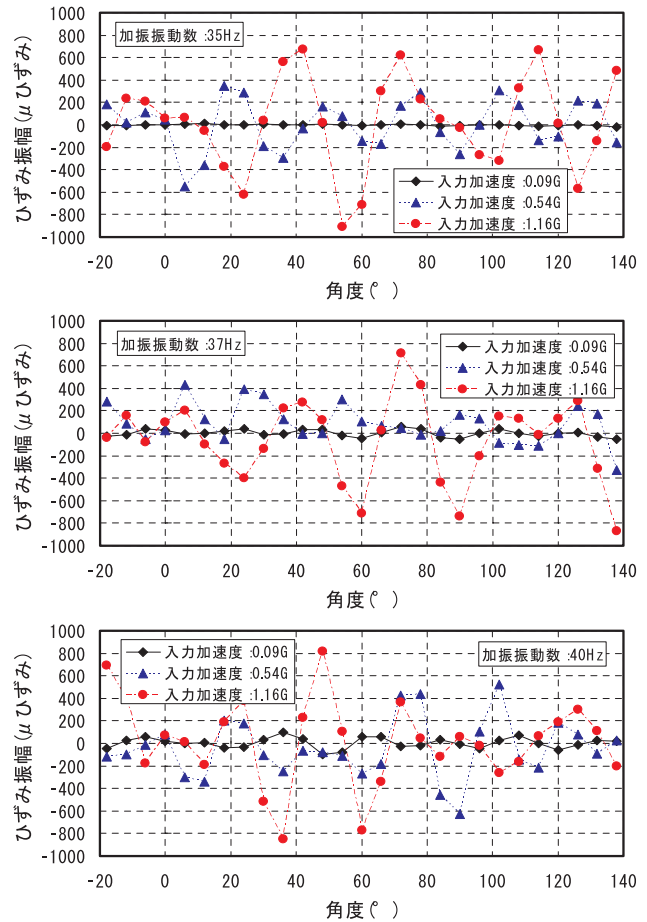


図11 オーバル振動による周方向ひずみの振幅の変化 (高さ700mm)

ることがわかった。これは、大入力加振のような従来よりも大きな地震動による耐震性評価においてはオーバル振動の振幅による影響を考慮することが必要であることを示唆しているものと考えられる。

耐震設計の信頼性を確保するためにも、オーバル振動の発生する条件を踏まえ、設計地震動が与えられた場合に影響があるかどうかを判断する方法を今後、検討し、規格化していくことは重要であると考えられる。

4. 考察

4.1 曲げ振動とオーバル振動との連成によるタンクの曲げ剛性の低下

上記に述べた振動実験の結果から、大入力の正弦波スイープ試験を行い、曲げ振動とオーバル振動とを連成させると、円筒形貯水タンクの共振振動数は低い振動数側へ移動し、応答倍率は低下するという

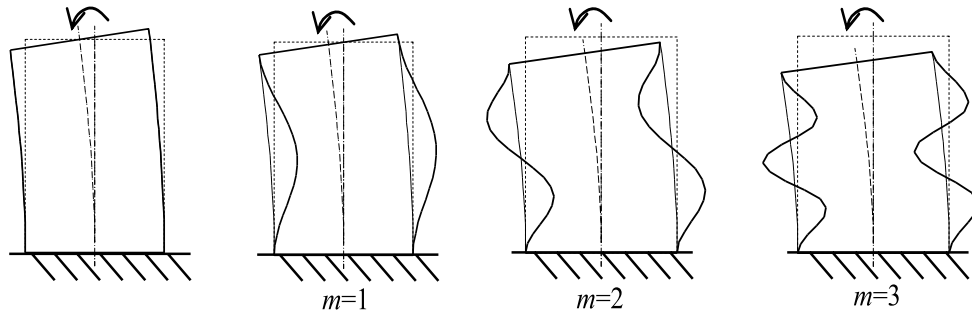


図12 オーバル振動の振幅によりタンク側面に有意な面外変形が生じているときの概念図

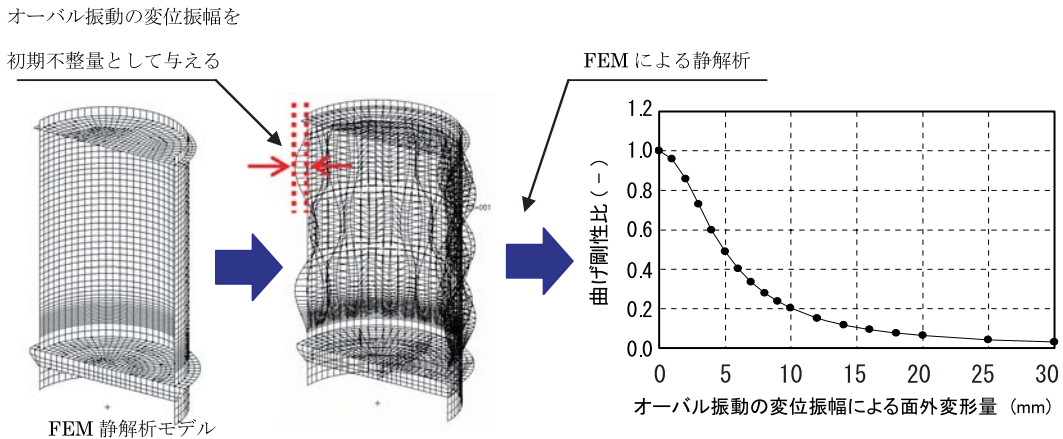


図13 円筒形タンクの曲げ剛性を求める静解析の概要

非線形振動応答を示すことがわかった。

曲げ振動とオーバル振動とが連成している時のタンク全体の振動挙動は、タンク側板にオーバル振動が大きな振幅を持って振動しながら、曲げ振動の応答をしているものと考えられる。このオーバル振動の振幅がタンク側板の板厚に対して無視できないほどの大きさを持つならば、面外変形がタンク側板に生じて曲げ振動の振動特性に幾何学的非線形性を生じさせると考えられる。オーバル振動の振幅により、タンク側面の軸方向に面外変形が生じている場合の概念図を図12に示す。この図では、タンク側板にオーバル振動が励起されていない時および軸方向半波数 m が1, 2および3のオーバル振動が励起されている場合を示している。オーバル振動が励起された状態で、タンク全体を振動させ、タンク全体に曲げモーメントが生じると、壁面の圧縮・引張剛性が低下し、タンク全体の曲げ振動の剛性が低下する。図には異なる軸方向半波数 m について示しているが、周方向波数 n も曲げ剛性へ影響を与えとされる。

オーバル振動の変位振幅によるタンク側面の面外変形がタンクの曲げ振動に影響を与えるという考え方の提案は、おそらく著者らが初めてであろうと考

えるが、この仮説の検証については、材料力学に基づいた考察を既報⁽³³⁾で行っている。ここでは、さらに詳細に考察するためにFEMを用いる。95%水位まで水で満たしたタンク試験体をFEMにより静解析モデルとして作成し、モデルの側面にオーバル振動の振幅による面外変形を初期不整として与えた。次に1Gの静荷重を与えて静解析を行い、モデルの曲げ振動に影響を与える円筒の横方向剛性を求めた。面外変形の大きさをいくつか変化させて、面外変形量と円筒の横方向剛性との関係を求めた。ここで、この剛性を曲げ剛性として定義する。上に述べた静解析の概要を図13に示す。

面外変形は、オーバル振動の振動モード形状と同じ形状とした。振動モード次数は振動試験から予想される現実的な範囲とした。オーバル振動の振幅の大きさに対応するタンク側板の最大面外変形量は、実験結果を包絡できるようにタンクの半径方向に0mmから50mmの範囲で変化させた。軸方向半波数 m を1, 2および3として、周方向波数 n を変化させた場合の解析結果を図14から図16に示す。

これらの図は、いずれの振動モード次数においても、円筒形貯水タンク試験体の曲げ振動の剛性が低

下することを示している。

これはオーバル振動の振幅によるタンク側板の面外変形が、タンクの曲げ振動の振動特性に幾何学的

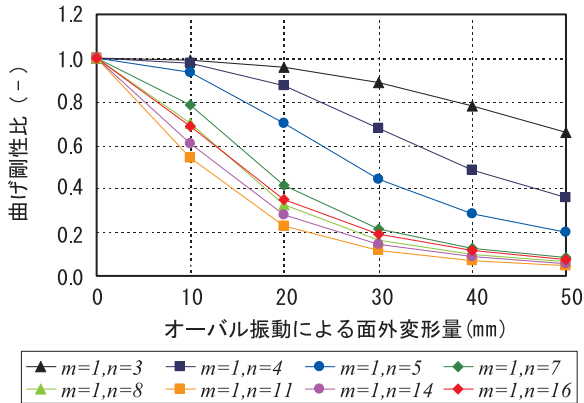


図 14 オーバル振動による面外変形量と曲げ剛性比 (変形量が0の時を1とする) との関係 (軸方向半波数; m=1の場合)

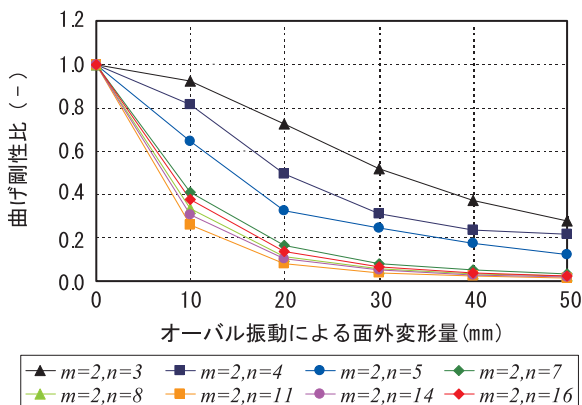


図 15 オーバル振動による面外変形量と曲げ剛性比 (変形量が0の時を1とする) との関係 (軸方向半波数; m=2の場合)

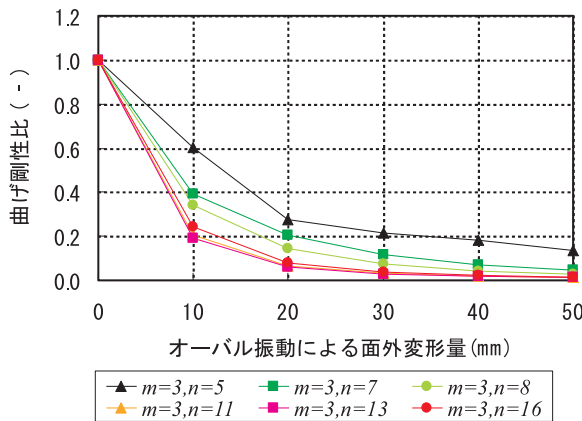


図 16 オーバル振動による面外変形量と曲げ剛性比 (変形量が0の時を1とする) との関係 (軸方向半波数; m=3の場合)

非線形性を生じさせるということを示している。

このように、オーバル振動と曲げ振動とが連成したときのタンクの非線形な振動応答が、オーバル振動による曲げ剛性の低下に基づくものであることを FEM によっても示すことができた。既報⁽³³⁾で提案した非線形 1 自由度系モデルはオーバル振動と曲げ振動との連成のメカニズムをうまく表していると考えられる。

図 17 は、この非線形 1 自由度系振動モデルの概念図である。1 自由度系振動モデルが持つばね定数はタンクの曲げ剛性を表し、振動しているオーバル振動の振幅の大きさに対応した値を持たせることで、オーバル振動の振幅の変化に対応して変化させている。

既報⁽³³⁾に示すように、提案する非線形 1 自由度系モデルは非線形ばね項をもつ運動方程式となり、式 (1) で表される。

$$\ddot{x} + 4\pi\zeta \cdot f_L \dot{x} + (2\pi f_L)^2 \cdot r(z) \cdot x = -\alpha \quad (1)$$

ここで、 x は変位、 ζ は減衰比、 α は外力による加速度であり、 f_L はオーバル振動が発生していない時の曲げ振動の固有振動数を表す。また、 $r(z)$ はタンク試験体の曲げ剛性比であり、オーバル振動の振幅による曲げ剛性の変化率を表すために導入したものである。 z はオーバル振動の振幅によって生じた面外変形量を示す。式 (1) が示すように、オーバル振動の振幅による曲げ剛性比 $r(z)$ により、運動方程式は非線形な関数方程式になる。

後述する数値シミュレーションでは、静解析で得られた面外変形量と曲げ剛性比との関係を用いる。これにより数値シミュレーションでは、オーバル振動の振幅による曲げ剛性の変化を 1 自由度系振動モデルのばね定数に置き換えて計算を行っている。

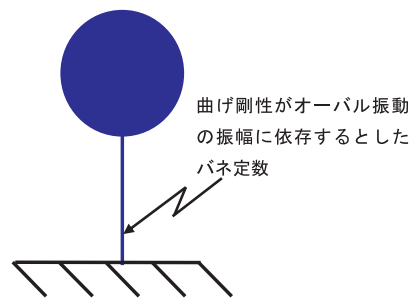


図 17 提案する等価な非線形 1 自由度系モデル

4.2 非線形振動モデルを用いた数値シミュレーション

提案する非線形1自由度系モデルの運動方程式(1)を用いて3節で述べた正弦波スイープ試験の数値シミュレーションを実施した。

数値シミュレーションは図18に示す解析フローで実施した。この図に示す各ステップを説明すると次のようになる。

(a)ステップ1：曲げ振動のモデル化

タンクの曲げ振動を曲げ振動の固有振動数で振動する1自由度系振動モデルへモデル化する。

(b)ステップ2：オーバル振動の曲げ剛性への影響評価

オーバル振動の振動モード形状を初期不整形と し、オーバル振動の変位振幅によるタンク側板の変形量を最大不整量とした静解析モデルを作成し、曲げ剛性を求める。

(c)ステップ3：オーバル振動によるタンク側板の面外変形量と曲げ剛性の関係

最大不整量を変化させて、不整量がゼロの場合に対する曲げ剛性比を求め、タンク側板の面外変形量と曲げ剛性との関係をまとめる。これは曲げ振動とオーバル振動との連成効果のモデル化を目的としたものである。

(d)ステップ4：曲げ剛性比を1自由度系振動モデルのばね定数へ反映

求めた曲げ剛性比を1自由度系振動モデルのばね定数の変化率とし、オーバル振動の振動挙動とばね

定数の変化とを関係付ける。

(e)ステップ5：等価な非線形1自由度系振動モデルの作成

曲げ剛性がオーバル振動の振幅に依存するとして、ばね定数をオーバル振動の振幅依存にした等価な非線形1自由度系振動モデルを作成する。

(f)ステップ6：応答計算の実施

得られた非線形1自由度系振動モデルに入力波形を与えて、数値解析を実施する。ここでは、解法はニューマーク法を用いた。

今回の数値シミュレーションで用いた諸元を表3に示す。数値シミュレーション結果を図19と図20に示す。図19は曲げ振動の共振振動数の低下割合とオーバル振動の振幅との関係を示している。この図の縦軸は固有振動数に対する比を示す。同時に実験結果も併記する。実験結果については、入力加速度0.09Gの結果を基準とした比として示している。実験結果のオーバル振動の振幅は、共振振動数付近のオーバル振動の最大振幅を採用した。数値シミュレーションの結果から、オーバル振動の振幅が大きくなるに従って、曲げ振動の共振振動数は低下することがわかる。そして、低下割合は、実験結果と全体として似ているが、特に、 $m = 1$ とした解析結果とよく一致している。

図20は曲げ振動の応答倍率とオーバル振動の振幅との関係を示す。この図の縦軸は応答倍率50に対する比を表わす。同時に実験結果も併記する。実験結

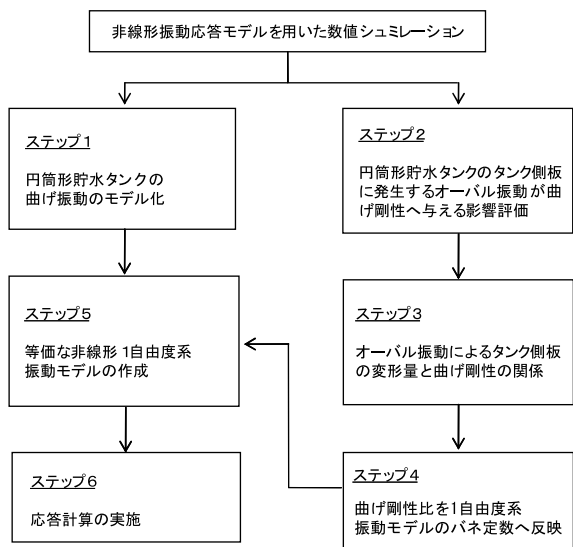


図18 非線形1自由度系モデルを用いた数値シミュレーションのフロー図

表3 非線形1自由度系モデルの応答解析に用いた振動パラメータ

項目		解析ケース					
		A	B	C	D	E	F
曲げ振動パラメータ	1次の曲げ振動の固有振動数 (Hz)	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
	減衰比 (%)	1	1	1	1	1	1
オーバル振動パラメータ	オーバル振動の固有振動数 (Hz)	25.0	52.4	78.5	83.8	95.7	52.4
	オーバル振動の軸方向半波数 (m)	1	1	1	2	3	1
	オーバル振動の周方向波数 (n)	8	12	14	14	14	12
入力波	正弦波						

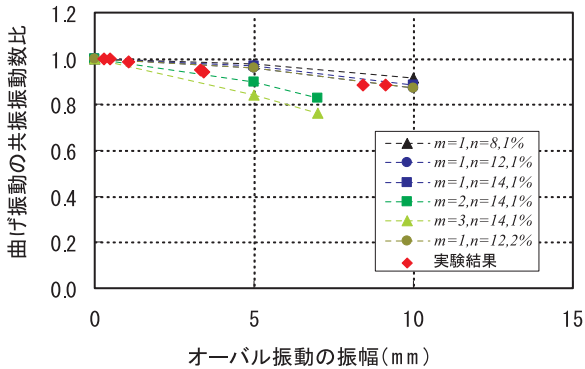


図19 数値シミュレーション解析結果(タンクの共振振動数とオーバル振動の振幅との関係)

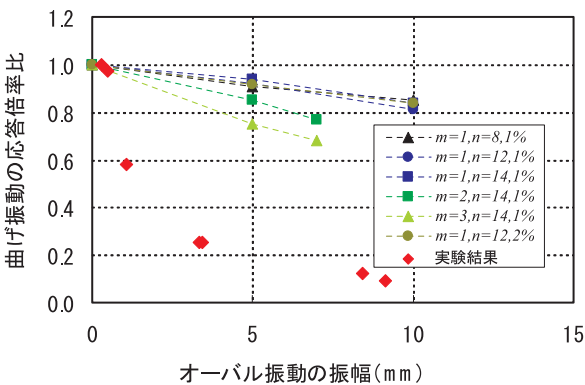


図20 数値シミュレーション解析結果(タンクの応答倍率とオーバル振動の振幅との関係)

果については、入力加速度0.09Gの結果を基準とした比で示している。数値シミュレーションの結果と実験結果はいずれもオーバル振動の振幅が大きくなると、応答倍率は低下する。しかし、数値シミュレーションの結果は、実験結果よりも緩やかに低下している。実際の振動実験では大振幅振動に起因する構造減衰の増加などの影響があるが、本シミュレーションで用いたモデルでは、オーバル振動による曲げ剛性の変化のみをモデル化していることが原因と考えられる。モデルの運動方程式(1)の減衰項には曲げ剛性比 $r(z) = 1$ の時の減衰比 を定数として入力しているだけである。厳密には、面外変形量 z の関数として減衰比 を与えるべきであろうが、本報の目的は、オーバル振動による面外変形が曲げ剛性へ与える影響の評価とその影響がタンク試験体の振動応答へ与える影響を評価することから、そこまでは実施しておらず、応答倍率の低下要因の一つを示すに止まったと考えられる。応答倍率の低下要因の解明と定量的評価については今後の課題としたい。

数値シミュレーションの結果はオーバル振動が大きくなると、曲げ振動の共振振動数と応答倍率ともに低下し、実験で得られた共振振動数の特性と傾向が一致していることから、提案する非線形1自由度系振動モデルは、簡易モデルながら実験結果の特性を模擬しているといえる。

以上をまとめると、円筒形タンクの曲げ振動とオーバル振動との連成効果の要因として、オーバル振動によるタンク側板の変形によって発生する幾何学的非線形性に着目した。そして、曲げ剛性がオーバル振動の振幅に依存するとした等価な非線形1自由度系振動モデルを提案した。このモデルは、振動実験の曲げ振動の共振振動数の低下現象を模擬でき、円筒形貯水タンクの非線形振動応答を説明する考え方の一つとすることができる。

5. 結言

本研究により、以下のことがわかった。

- (1) 円筒形貯水タンクにおいて、大入力加振を行い、曲げ振動とオーバル振動とが連成すると、共振振動数が低い振動数へ移動し、応答倍率が低下するという非線形振動応答が生じる。
- (2) 大入力加振時には、オーバル振動の振幅は無視できないほど大きく、オーバル振動の振幅による面外変形によって発生する幾何学的非線形性が、曲げ振動に影響を与えることで、曲げ振動とオーバル振動との連成効果が生じている。
- (3) 円筒形タンクの側板で発生するオーバル振動の振幅による面外変形により、タンクの曲げ剛性が低下する。
- (4) オーバル振動による面外変形がタンクの曲げ剛性を低下させるという新しい考え方に基づいて、オーバル振動の振幅に依存して変化するばねを持つという等価な非線形1自由度系モデルを提案した。
- (5) この非線形1自由度系振動モデルは、簡易モデルでありながらも、振動試験の結果を模擬できた。
- (6) 振動試験の結果で得られたように、大入力加振時にオーバル振動が円筒形タンクの曲げ振動へ無視できない影響を与えるということは、従来よりも大きな地震動による耐震評価では、オーバル振動の振幅による影響も考慮することが必要であることを示唆する。

- (7) 耐震設計の信頼性を確保するためにも、オーバー振動の発生する条件を踏まえ、設計地震動が与えられた場合に影響があるかどうかを判断する方法を今後、検討し、規格化していくことは重要であると考えられる。

謝辞

本研究の振動実験は、石川島播磨重工業(株)耐震実験場の大型3次元振動台を利用した。振動台操作でご協力いただいた、石川島検査計測(株)の岩船正明氏と片岡威氏に謝意を表す。

文献

- (1) 尾池和夫, 活動期に入った地震列島, 岩波書店, (1995).
- (2) 岡本拓夫他, "北陸地方西方沿岸及びその周辺域における最近の地震活動について," 京都大学防災研究所年報, 第45号B, pp.95-100 (2002).
- (3) 座間信作, "地震とタンクの安全 - 十勝沖地震と苫小牧での石油タンク被害 -," 保守検査・赤外線サーモグラフィ合同シンポジウム講演論文集, pp.83-92 (2004).
- (4) 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).
- (5) 日本建築学会編, 2005年福岡県西方沖地震災害調査報告, 日本建築学会, (2005).
- (6) 原子力安全委員会 原子力安全基準・指針専門部会 耐震指針検討分科会 第48回会合, <http://www.nsc.go.jp/senmon/shidai/taisinbun/taisinbun048/taisinbun-si048.htm>, (2006).
- (7) Sugiyama, A., et al., "Investigation on Buckling Behavior of Cylindrical Liquid Storage Tanks under Seismic Loading (3rd Report; Proposed Design Procedure Considering Dynamic Response Reduction)," ASME-PVP, Vol.466, pp.235-242 (2003).
- (8) 三上晃他, "立体配管系の耐震安全裕度評価手法に関する研究," 日本機械学会第16回計算力学講演会講演論文集, No.818, pp.737-738 (2003).
- (9) 原子力安全基盤機構, 平成16年度 経年設備の耐震安全評価手法に関する報告書 経年設備耐震その1 (炉内構造物, 配管), (2005).
- (10) 小川信行, "耐震信頼性の維持向上とE-デイフェンスの活用," 日本溶接協会 原子力構造機器の材料, 設計, 施工, 検査, 維持に関する講習会テキスト, pp.137-168 (2005).
- (11) Fujita, K., et al., "Proving Test on the Seismic Reliability for the PWR Primary Coolant Loop System," ASME-PVP, Vol.182, pp.303-308 (1989).
- (12) Akiyama, H., et al., "Proving Test on the Seismic Reliability of the PWR Reactor Vessel," 11th SMiRT, Vol.K, No.16/1, pp.427-432 (1991).
- (13) 藤田隆史他, "原子炉停止時冷却系等耐震実証試験," 日本原子力学会 1996年秋の大会, p.394 (1996).
- (14) 中村進他, "コンクリート製原子炉格納容器耐震実証試験 (I.PCCV耐震実証試験) その1," 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1123-1124 (1996).
- (15) 原子力安全基盤機構, 平成15年度 原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書 配管系終局強度, (2004).
- (16) Maekawa, A., et al., "Vibration Test of 1/10 Scale Model of Cylindrical Water Storage Tank," ASME-PVP, Vol.486-1, pp.107-117 (2004).
- (17) Suzuki, K., et al., "Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Safety Margin of Seismic Design Code for Piping)," ASME-PVP, PVP 2005-71005, pp.1-9 (2005).
- (18) 日本電気協会, 原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG 4601-1987), (1987).
- (19) 日本建築学会, 容器構造設計指針・同解説, (1996).
- (20) 高圧ガス保安協会, 高圧ガス設備等耐震設計指針, (1997).
- (21) 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).
- (22) 日本ガス協会, LNG地上式貯槽指針, (2002).
- (23) 日本電気協会, 火力発電所の耐震設計規程 (JEAC 3605-2004), (2004).
- (24) American Water Works Association, AWWA D 100-84 AWWA Standard for Welded Steel Tanks for Water Storage, (1984).
- (25) American Petroleum Institute, API Standard 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage, (1993).
- (26) European Committee for Standardization, Eurocode 8: Design Provisions of Earthquake

Resistance of Structures, Part 4: Silos, Tanks and Pipelines, (1998).

- (27) Housner, G. W. and Haroun, M. A., "Vibration Tests of Full-Scale Liquid Storage Tanks," Proc. of 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering, pp.137-145 (1978).
- (28) Shin, C. F. and Babcock, C. D., "Scale Model Buckling Tests of a Fluid Filled Tank under Harmonic Excitation," ASME-Paper 80-C2/PVP-66, pp.1-7 (1980).
- (29) Chiba, M., "Dynamic Stability of Liquid-Filled Cylindrical Shell under Horizontal Excitation, Part I: Experiment," J. Sound Vib., Vol.104, No.2, pp.301-319 (1986).
- (30) 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ーバル振動現象)," 日本機械学会論文集(C編), 70巻, 695号, pp.9-17 (2004).
- (31) 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).
- (32) Maekawa, A., et al., "Experimental Study of Coupling Vibration Characteristics between a Thin Cylindrical Water Storage Tank and its Contained Liquid," ASME-PVP, PVP 2005-71256, pp.1-8 (2005).
- (33) 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) - 曲げ振動とオーバーバル振動との連成効果 - ," INSS Journal, Vol.12, p.128 (2005).