

図3 試験装置の概要

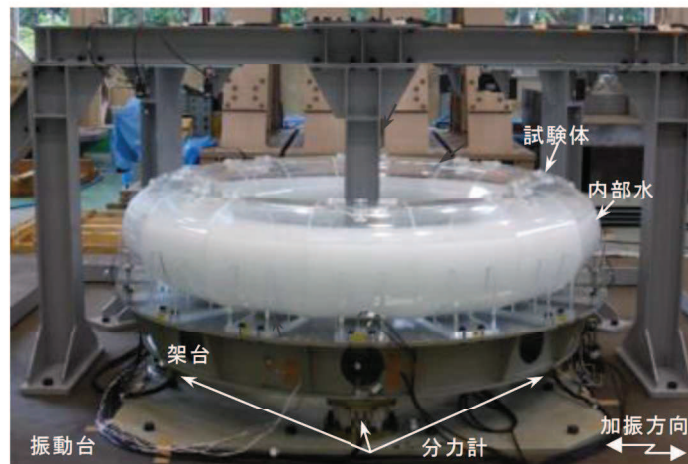


図4 試験装置の写真

### 2.2.2 計測項目及び計測機器設置

計測項目を表3に示す。これらのうち内部水の有効質量を評価する上で重要な計測項目は振動台上の加速度，試験体への入力となる架台上の加速度及び反力である。計測機器設置位置を図5に示す。

表3 計測項目

| 計測項目 | 計測機器 | 位置    | 計測チャンネル数 (設置位置)  |
|------|------|-------|--|
| 反力   | 分力計  | 架台下方  | 3成分(X, Y, Z) : 4 (0°, 90°, 180°, 270°)   |
| 加速度  | 加速度計 | 振動台上  | X成分: 2 (0°, 180°)<br>Y成分: 2 (90°, 270°)<br>Z成分: 4 (0°, 90°, 180°, 270°)                                  |
|      |      | 架台下端  | X成分: 2 (0°, 180°)<br>Y成分: 2 (90°, 270°)<br>Z成分: 4 (0°, 90°, 180°, 270°)                                  |
|      |      | 試験体下端 | X成分: 4 (0°, 45°, 135°, 180°)<br>Y成分: 4 (45°, 90°, 135°, 270°)<br>Z成分: 6 (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 270°) |

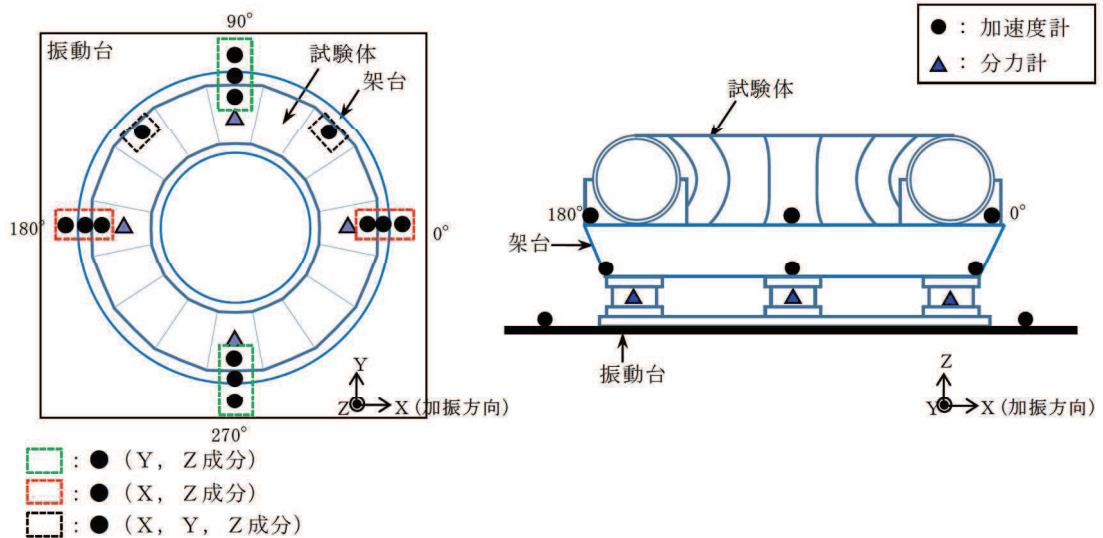


図5 計測機器設置位置

## 2.2.3 試験条件

### (1) 入力波条件

振動台への入力波は、女川 2 号機のサプレッションチェンバ設置床（原子炉建屋基礎版上）における基準地震動  $S_s$  相当\*の応答加速度時刻歴波を、表 2 に示した相似比で時間軸を圧縮している。また、振動台の加振限界振動数以上の成分については、応答加速度時刻歴波の圧縮時に 7.5Hz ローパスフィルタ処理（時間軸圧縮後約 38Hz）を実施している。なお、圧縮後の応答加速度時刻歴波には、試験体のスロッシング周期成分が含まれる。

加振方向は水平 1 方向とし、入力倍率は、上記の応答加速度時刻歴波の 0.5 倍、1.0 倍及び 1.5 倍の 3 ケースとする。サプレッションチェンバ設置床における基準地震動  $S_s$  相当の応答加速度時刻歴波形及び応答加速度スペクトルを図 6 及び図 8、振動台への入力波に対するものを図 7 及び図 9 に示す。

注記 \*：平成 25 年 12 月設置変更許可申請時基準地震動  $S_s$  のうち試験体内部水のスロッシングの卓越周期帯で応答加速度が大きい  $S_s-2$  を採用

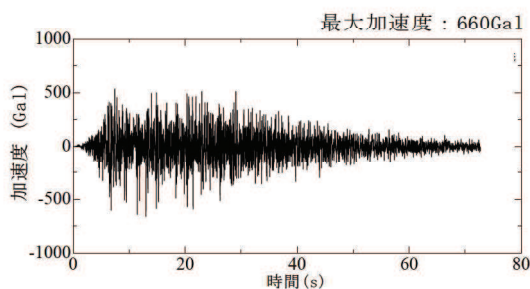


図 6 基準地震動  $S_s$  相当の  
応答加速度時刻歴波形

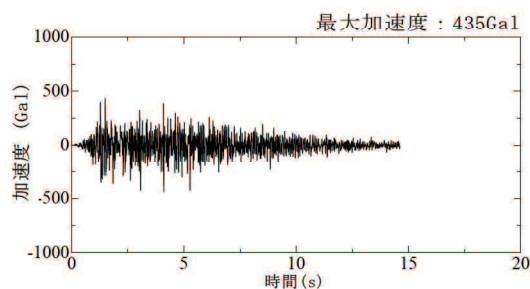


図 7 振動台入力加速度時刻歴  
波形(相似則適用)

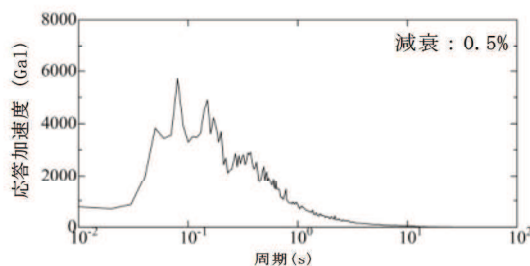


図 8 基準地震動  $S_s$  相当の  
応答加速度スペクトル

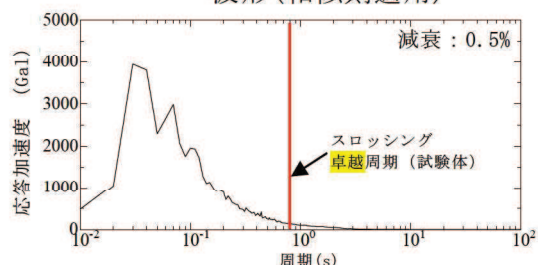
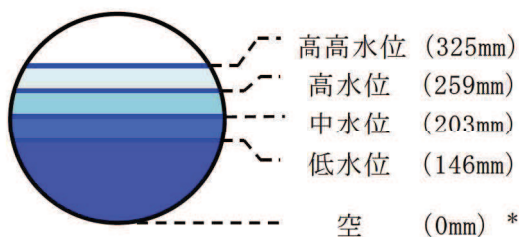


図 9 振動台入力応答加速度  
スペクトル(相似則適用)

### (2) 水位条件

試験水位レベルは、水を入れない空、低、中、高、高高の計 5 ケースとする（図 10）。試験回数は 1 ケースにつき 3 回以上実施する。



\*：括弧内は試験体  
底面からの高さ

図 10 試験水位レベル

### (3) 温度条件

今回実施した振動試験については、以下の検討を踏まえ、常温下で実施している。

① サプレッションチェンバの耐震評価において考慮する運転状態（重大事故等時の荷重の組合せについては、「重大事故等対処設備について（補足説明資料） 39条 地震による損傷の防止 39-4 重大事故等対処施設の耐震設計における重大事故と地震の組合せについて」にて説明）

- ・ サプレッションチェンバの耐震評価は、設計基準事故時及び重大事故等時ともに、事故の発生確率、継続時間及び地震の年超過確率を踏まえ、地震荷重と事故時の荷重の組合せを考慮するため、今回実施した振動試験の温度条件（水温）は、基準地震動  $S_s$  と荷重の組合せが必要となる運転状態を考慮
- ・ 設計基準事故時は、基準地震動  $S_s$  との組合せは不要であるため、温度条件は通常運転状態（飽和温度以下）
- ・ 重大事故等時は、事象発生後  $2 \times 10^{-1}$  年以降の荷重と基準地震動  $S_s$  との組合せとなるため、温度条件は飽和温度以下（沸騰状態ではない）

② 水温による有効質量比への影響

- ・ 有効質量に関連する内部水の質量は、密度の関数であり、水温が飽和温度以下では温度変化に対する影響は小さい

なお、サプレッションチェンバの耐震評価における地震応答解析及び応力評価に用いる部材温度は、運転状態を考慮した温度条件を用いる。

## 2.2.4 有効質量比の算出方法

本試験から得られる計測荷重  $F$  と架台上の計測加速度（＝試験体への入力加速度） $\ddot{x}$  との関係は、運動方程式から下式で表される。

$$F = (M + M_E)\ddot{x}$$

ここで、

$M$ ：試験体（構造体）の質量

$M_E$ ：内部水の有効質量

上式のとおり、試験体（構造体）の質量と内部水の有効質量の合計値は、計測加速度に対する計測荷重の比として表されることから、水有りの試験結果及び空の試験結果の計測加速度と計測荷重の関係から回帰直線の傾きを求め、両者の回帰直線の傾きの差から内部水の有効質量が算出される（図 11 参照）。

なお、有効質量の算出においては、計測荷重  $F$  について 2Hz のハイパスフィルター処理を行い、スロッシング周期成分を取り除いている（別紙 12 参照）。

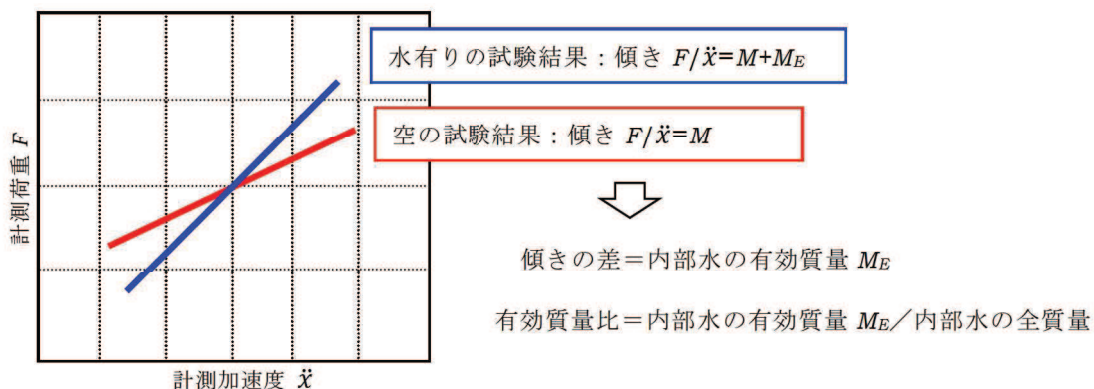


図 11 内部水の有効質量  $M_E$  及び有効質量比の算出方法

## 2.2.5 有効質量比の算出結果

1.0 倍入力、低水位の試験ケースにおける計測荷重の時刻歴を図 12 に、架台上の計測加速度に対する荷重をプロットしたものを図 13 に、各ケースの試験結果から算出した有効質量比を表 4 及び図 14 に示す。なお、各ケースの試験結果は、再現性があり、ばらつきがほとんどないことを確認している（別紙 13 参照）。

また、図 15 に示す計測荷重  $F$  のフーリエスペクトルから、約 0.8 秒（実機寸法では約 4 秒）にピークを確認したことから、振動試験においてスロッシングによる荷重が発生している。

各ケースの試験結果から、水位の増加に伴い有効質量比も増加すること、入力倍率の違いによる有効質量比の差は小さいことを確認した。

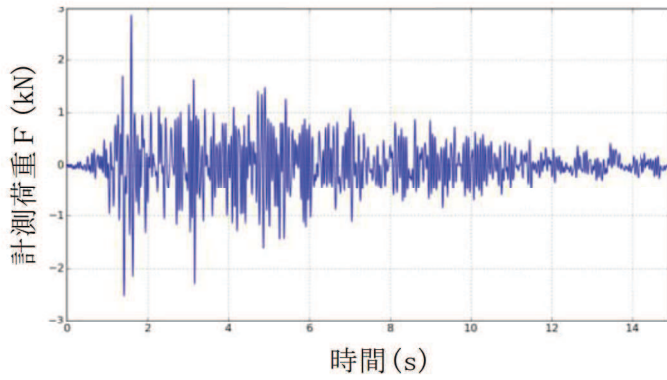


図 12 計測荷重の時刻歴

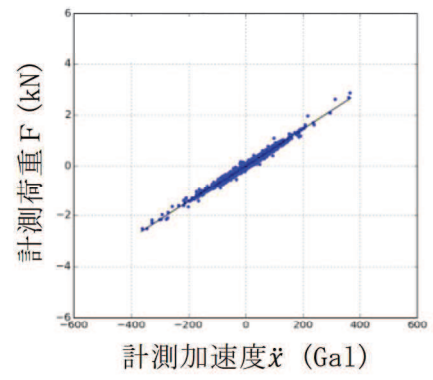


図 13 計測加速度と計測荷重の関係

表 4 試験結果から算出した有効質量比

| 水位         | 入力倍率*            |                  |                  |
|------------|------------------|------------------|------------------|
|            | 0.5 倍            | 1.0 倍            | 1.5 倍            |
| 低 (146mm)  | 0.14<br>(0.0061) | 0.12<br>(0.0237) | 0.14<br>(0.0138) |
| 中 (203mm)  | 0.20<br>(0.0050) | 0.21<br>(0.0077) | 0.21<br>(0.0066) |
| 高 (259mm)  | 0.28<br>(0.0027) | 0.28<br>(0.0015) | 0.29<br>(0.0035) |
| 高高 (325mm) | 0.41<br>(0.0025) | 0.42<br>(0.0032) | 0.41<br>(0.0041) |

注記 \*：括弧内は、複数回実施した試験結果から得られた有効質量比の標準偏差

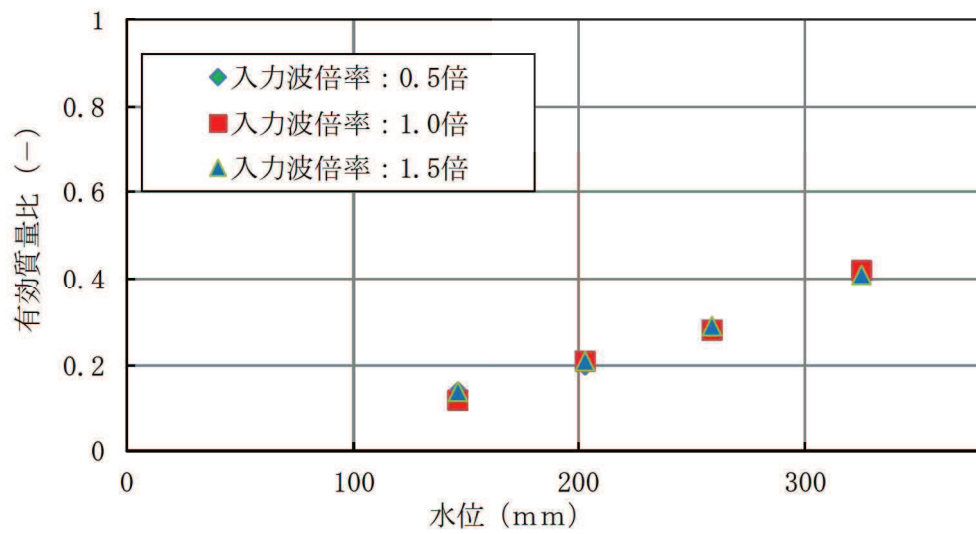


図 14 振動試験における水位と有効質量比の関係

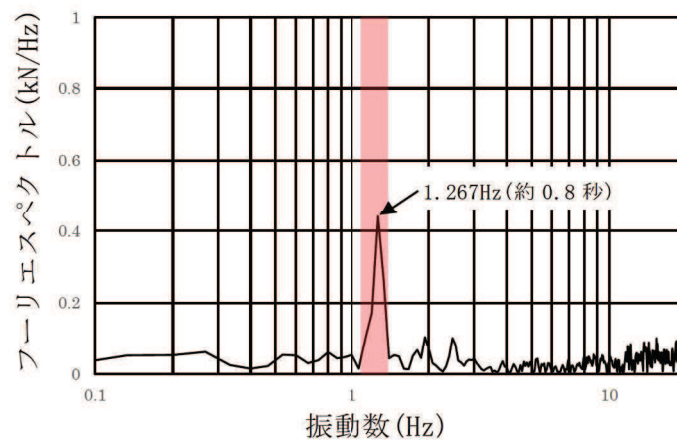


図 15 計測荷重のフーリエスペクトル（低水位，入力倍率 1.0 倍）

### 2.3 流体解析による試験体解析モデルの有効質量比の算出

円環形状容器の内部水の有効質量算出に仮想質量法を用いることの妥当性を検証するため、振動試験に加えて、振動試験に用いた試験体の流体解析モデルを作成し、流体解析により有効質量比を算出する。

#### 2.3.1 解析モデル

振動試験にて用いた試験体をもとに作成した流体解析モデルを図 16 に示す。



図 16 流体解析モデル（試験体解析モデル）

#### 2.3.2 解析条件

流体解析に用いる入力波は、振動試験で計測された試験体への入力波（架台上で計測された加速度時刻歴波）とする。水位は、代表として低水位及び高水位とする。

#### 2.3.3 有効質量比の算出方法

流体解析から得られる荷重  $F$ 、入力加速度  $\ddot{x}$  及び内部水の有効質量  $M_E$  との関係は、運動方程式から下式で表される。

$$F = M_E \cdot \ddot{x}$$

上式のとおり、内部水の有効質量  $M_E$  は、入力加速度  $\ddot{x}$  と流体解析から得られる荷重  $F$  の関係から回帰直線の傾きから有効質量が算出される（図 17 参照）。

なお、有効質量比の算出においては、荷重時刻歴波形について 2Hz のハイパスフィルター処理を行い、スロッシング周期成分を取り除いている。

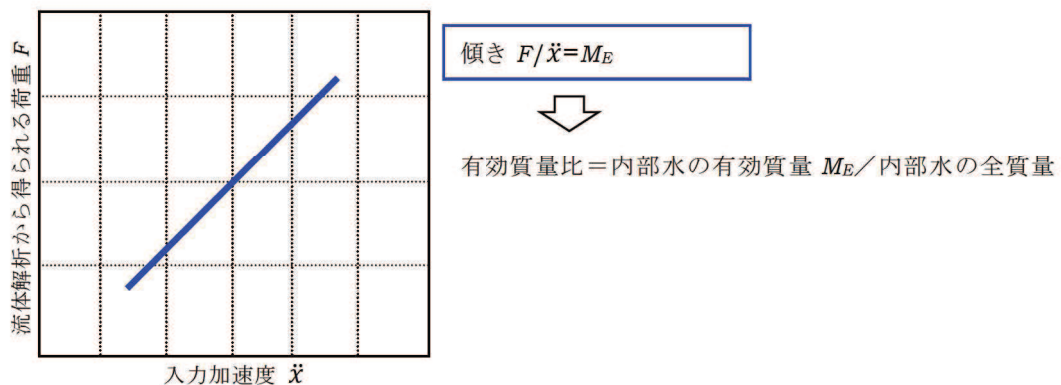


図 17 内部水の有効質量  $M_E$  及び有効質量比の算出方法



#### 2.3.4 解析結果及び有効質量比の確認

1.0 倍入力，低水位の解析条件に対して流体解析により算出した荷重時刻歴を図 18 に，入力加速度に対する荷重をプロットしたものを図 19 に示す。また，図 19 の入力加速度と荷重の関係から回帰直線の傾きを求め，内部水の有効質量比を算出した結果を表 5 に示す。

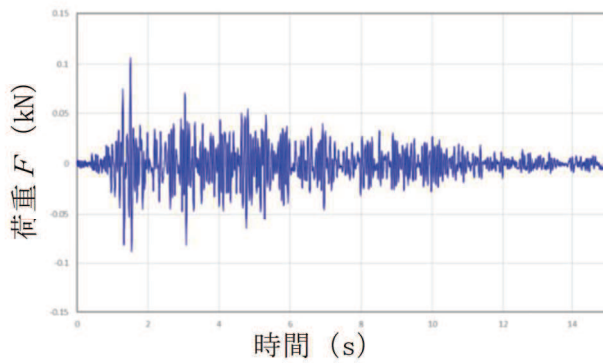


図 18 荷重時刻歴

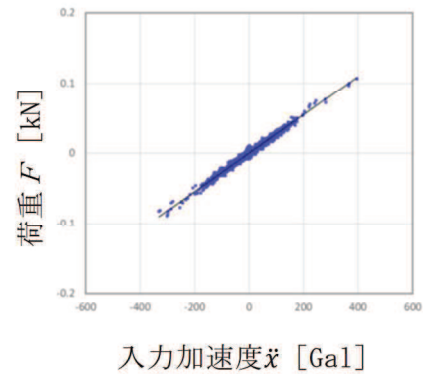


図 19 入力加速度と荷重の関係

表 5 流体解析により算出した有効質量比

| 水位        | 有効質量比[-] |
|-----------|----------|
| 低 (146mm) | 0.14     |
| 高 (259mm) | 0.28     |

## 2.4 妥当性検証

上記2.1項～2.3項で得られた有効質量比を比較し、**仮想質量法**で算出した円環形状容器の内部水の有効質量比の妥当性を検証する。

2.1項～2.3項に示した**仮想質量法**、振動試験及び**流体解析**により算出した有効質量比を整理して表6及び図20に示す。

入力波の特性に関係なく、容器の形状及び水位により有効質量比が定まる**仮想質量法**により算出した有効質量比に対し（別紙14参照）、内部水の流動を直接考慮した振動試験及び**流体解析**から算出した有効質量比が同等であることを確認したことから、**仮想質量法**により算出される有効質量比は妥当であると考えられる。

また、有効質量比は、振動試験の結果から再現性があり、ばらつきがほとんどないことを確認した。

表6 各方法による有効質量比の評価結果

| 水位         | <b>仮想質量法</b> | 振動試験* | <b>流体解析</b> |
|------------|--------------|-------|-------------|
| 低 (146mm)  | 0.15         | 0.12  | 0.14        |
| 中 (203mm)  | 0.22         | 0.21  |             |
| 高 (259mm)  | 0.30         | 0.28  | 0.28        |
| 高高 (325mm) | 0.41         | 0.42  |             |

注記\*：入力倍率 1.0 倍ケースの値

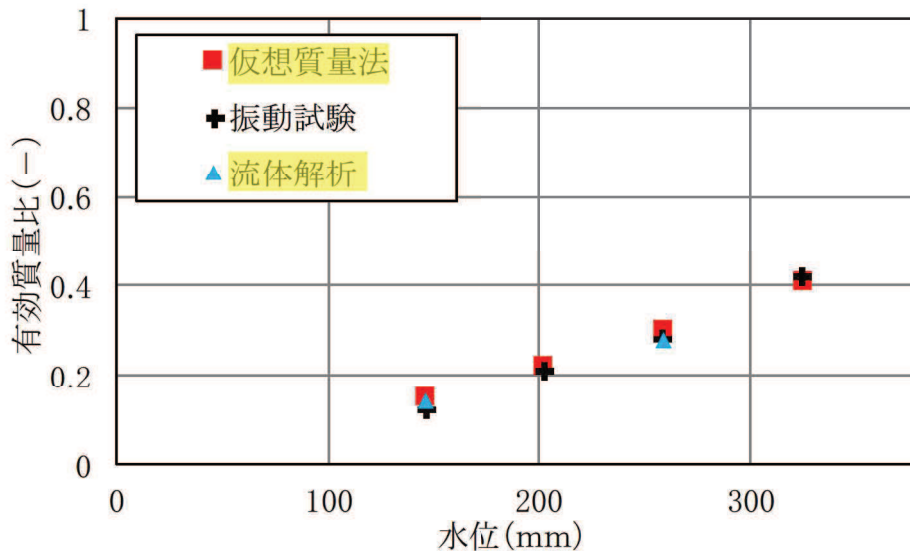


図20 各手法の有効質量比の評価結果

### 3. 耐震評価に用いる有効質量の設定

女川2号機の実機評価に適用する有効質量は、実機解析モデルに対する**仮想質量法**と内部構造物を含む実機解析モデルに対する**流体解析**による有効質量比を比較し、その妥当性を検証した上で、解析プログラム間の値の差異や試験結果との差異等を踏まえて**仮想質量法**で算出された値の保守性を検討し、設定する。

#### 3.1 **仮想質量法**による実機の有効質量比の算出

2項により妥当性を確認した**仮想質量法**を用いて、女川2号機の実機解析モデルにより有効質量比を算出する。

##### 3.1.1 **仮想質量法**に用いる実機解析モデル

**仮想質量法**に用いる実機解析モデルを図 21 に示す。

女川 2 号機の実機解析モデルは、サブプレッションチェンバ（強め輪を含む）の寸法、剛性を模擬したシェル要素とし、内部水の水位を設定する。なお、本解析モデルは、サブプレッションチェンバの内部水の有効質量の算出に用いるものであり、ボックスサポートは模擬していない。

内部水の水位は、図 22 に示すとおり、通常運転水位及び重大事故**等**時水位より高い水位（真空破壊装置下端水位）（以下、「耐震解析用重大事故**等**時水位」という。）の 2 ケースとする。

なお、重大事故**等**時水位は、重大事故後の状態で弾性設計用地震動  $S_d$  及び基準地震動  $S_s$  による地震力と組み合わせる水位である。

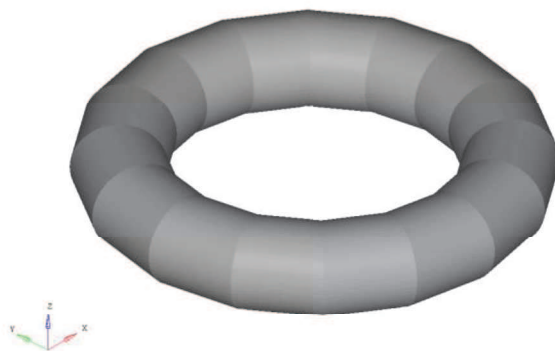


図 21 **仮想質量法**に用いる実機解析モデル

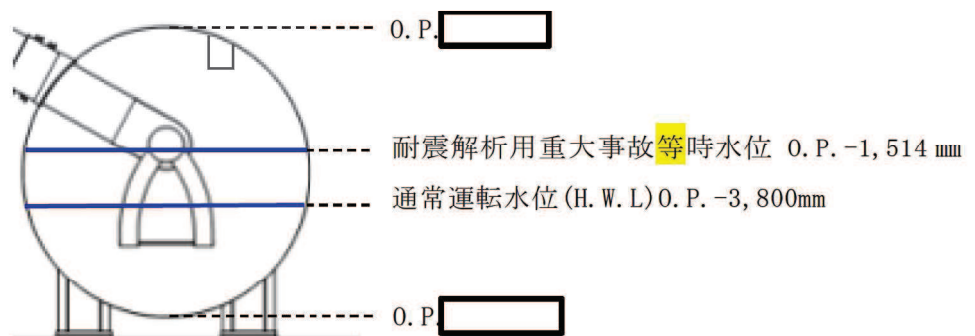


図 22 解析水位ケース

### 3.1.2 流体解析による実機の有効質量比の算出

仮想質量法の実機解析の妥当性を検証するため、女川2号機の主要な内部構造物をモデル化した実機解析モデルを用いて流体解析により有効質量比を算出し、仮想質量法の有効質量比と比較する。

流体解析に用いる女川2号機の実機解析モデルの水位条件は、仮想質量法と同じである(図23)。また、入力地震動は、基準地震動 $S_s$ の特徴を踏まえ、スロッシングの卓越周期帯の応答加速度が比較的大きく、継続時間が長い $S_s-D1$ を用いた(別紙15参照)。

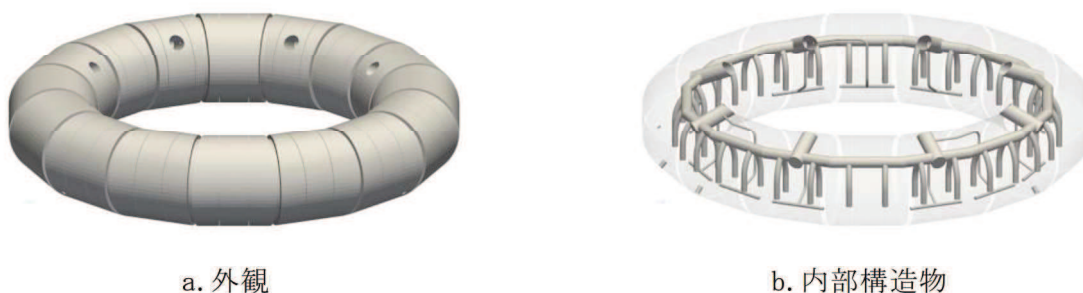


図23 流体解析に用いる実機解析モデル

### 3.1.3 解析結果

仮想質量法及び流体解析による女川2号機の実機サプレッションチェンバ内部水の有効質量比の算出結果を表7に示す。有効質量比は、各水位において仮想質量法により算出した有効質量比の方がやや大きい値となっている。この差異は、有効質量比の算出において、容器の形状と水位から一義的に求まる(内部水の流動を考慮しない)仮想質量法に対し、流体解析では内部水の流動が考慮されることから、液面変動による効果によりこのような傾向となるものと推定される。また、本傾向は、2.4項に示す仮想質量法の妥当性検証における仮想質量法の有効質量比と振動試験及び流体解析の有効質量比の比較結果と整合している。

なお、仮想質量法による実機解析モデルの有効質量比に対する試験体解析モデルの有効質量比の差は、強め輪の有無によるものであり、内部水の断面積に対する強め輪の面積の割合が大きいほど、大きくなると考えられる。そのため、耐震解析用重大事故等時水位に対して通常運転水位の試験体解析モデルに対する実機解析モデルの有効質量比の増加割合が大きくなると考えられる。

表7 女川2号機の実機有効質量比算出結果

| 水位               | 実機解析モデル |           | 試験体解析モデル |
|------------------|---------|-----------|----------|
|                  | 仮想質量法   | 流体解析      | 仮想質量法    |
|                  |         | S s - D 1 |          |
| 通常運転水位 (H. W. L) | 0.24    | 0.22      | 0.15     |
| 耐震解析用重大事故等時水位    | 0.33    | 0.32      | 0.30     |

### 3.2 不確かさを踏まえた耐震評価用の有効質量の設定

女川2号機の実機評価に適用する有効質量の設定に当たり、仮想質量法に対する流体解析及び振動試験の値の差異等を踏まえ、仮想質量法で算出された値の保守性を検討し、女川2号機の実機評価に適用する有効質量を設定する。

試験体モデルに対しては、表6のとおり、仮想質量法、振動試験及び流体解析により算出した有効質量比は同等であり、おおむね仮想質量法の値が保守的な傾向を示す。また、有効質量比は、振動試験の結果から、再現性があり、ほとんどばらつきがなく算出できることを確認した。

実機解析モデルに対しては、表7のとおり、仮想質量法により算出される有効質量比は、内部水の流動による有効質量比の低減が反映されないため、流体解析により算出される有効質量比よりも保守的な値となっている。

また、容器構造設計指針・同解説に記載されている球形タンク及び円筒タンクの有効質量比に対して、仮想質量法を用いて有効質量比の確認解析を実施したところ、いずれのタンクに対しても有効質量比がほぼ一致している、又は仮想質量法の値が保守的な傾向となっている（別紙16参照）。

したがって、女川2号機の地震応答解析に考慮する有効質量は、仮想質量法により算出される有効質量比が、他評価手法及び容器構造設計指針に対して一致もしくはおおむね保守的な傾向（有効質量比が大きくなる）を示すことから、仮想質量法により算出される有効質量を適用する。

なお、評価手法の違い（仮想質量法と流体解析）による有効質量比の差異によって、サプレッションチェンバの固有周期が変動するため、工認段階においては、耐震評価に用いる床応答スペクトルとの関係にも配慮し、地震荷重を算出する。

## サプレッションチェンバ内部水の地震応答解析モデルへの設定方法

## 1. 概要

今回工認に用いる女川 2 号炉のサプレッションチェンバ地震応答解析モデル(はり要素を用いた 3 次元多質点モデル)における内部水の有効質量は、NASTRAN を用いた仮想質量法(以下、仮想質量法という。)(シェル要素を用いた実機解析モデル)により算出される各要素の有効質量及びその位置(高さ)を考慮し、地震応答解析モデルの各質点に縮約して設定する。

本資料では、その設定方法の考え方について説明する。

## 2. 縮約

縮約とは、膨大な数のデータを扱う有限要素法などの解析において、行列の大きさ(次元)を小さくする解析上のテクニックであり、その手法として、Guyan の縮約法(Guyan's Reduction)が広く一般的に使われている。

サプレッションチェンバの内部水に対する有効質量を地震応答解析モデルに設定するに当たり、この手法を用いて、仮想質量法により算出されるサプレッションチェンバシェルの各要素の有効質量及びその位置(高さ)を、地震応答解析モデルの各質点に縮約する(図 1 参照)。

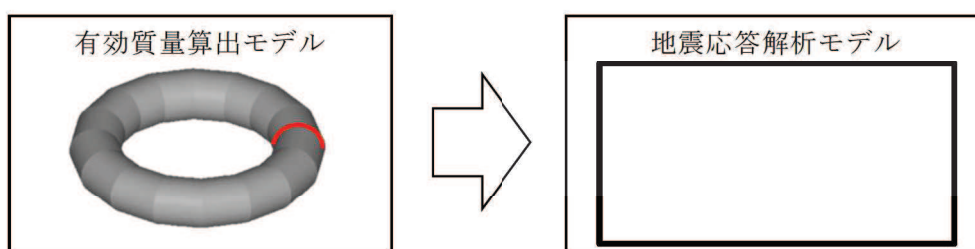


図 1 有効質量の縮約

## 3. 地震応答解析モデルへの設定方法

## 3.1 地震応答解析モデルへの設定方法の考え方

仮想質量法により算出されるサプレッションチェンバシェルの各要素の有効質量及びその位置(高さ)を、地震応答解析モデルのサプレッションチェンバの各質点に設定する方法(Guyan の縮約法)のイメージを図 2 に示す。

## ① 仮想質量法から算出されるサプレッションチェンバの内部水の有効質量

仮想質量法ではサプレッションチェンバシェルの各要素に対する内部水の有効質量が算出されており、解析モデルの一断面を考えた場合、有効質量算出モデルの 1 要素における有効質量  $m_i$  は、水平方向及び鉛直方向の有効質量 ( $m_{xi}$ ,  $m_{zi}$ ) に分解できる。

なお、水平方向の有効質量  $m_{xi}$  をサプレッションチェンバ全体に積分するとサプレッションチェンバの内部水に対する有効質量と一致し、また、鉛直方向の有効質量  $m_{zi}$  をサプレッションチェンバ全体に積分した場合、サプレッションチェンバシェルの底面圧

力による荷重と一致する。

② 地震応答解析モデルのはり要素（1 質点）への縮約（1 要素の有効質量）

上記①で示した水平方向及び鉛直方向の有効質量（ $m_{xi}$ ,  $m_{zi}$ ），その位置（高さ）を考慮し，それらが地震応答解析モデルのはり要素（1 質点）における慣性力及び回転慣性力が等価となるように，並進質量（ $m_x$ ,  $m_z$ ）及び回転質量（ $Rm_x$ ,  $Rm_z$ ）を設定する。

なお，回転質量  $Rm_z$  は，サプレッションチェンバシエルの底面圧力によるモーメントとして考慮される。

③ 地震応答解析モデルのはり要素（1 質点）への縮約（全要素の有効質量）

仮想質量法により算出されるサプレッションチェンバシエル全要素の有効質量に対して，上記②の考え方を 3 次元の位置関係を考慮して展開し，地震応答解析モデルのはり要素（1 質点）における並進質量（ $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$ ）及び回転質量（ $Rm_x$ ,  $Rm_y$ ,  $Rm_z$ ）に縮約する。

④ 地震応答解析モデル（全質点）における有効質量の設定

地震応答解析モデルにおけるはり要素の全質点に対して，上記③の考え方を展開し，並進質量（ $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$ ）及び回転質量（ $Rm_x$ ,  $Rm_y$ ,  $Rm_z$ ）が設定される。

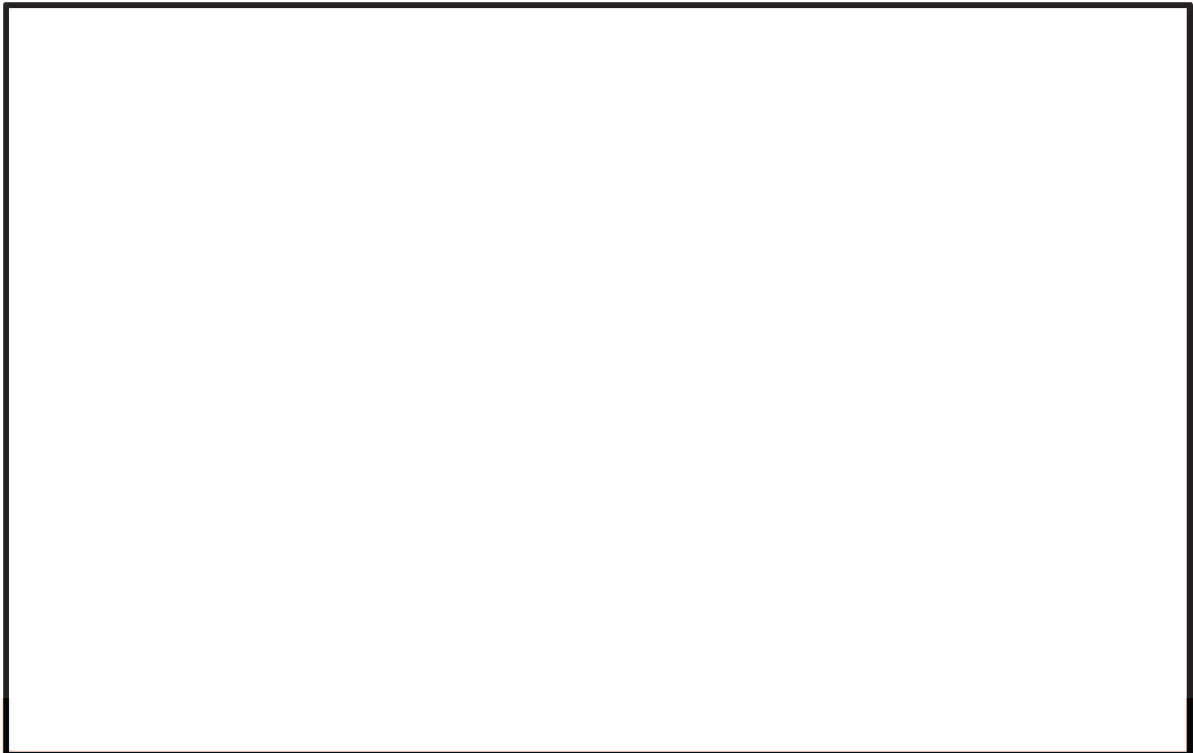


図 2 Guyan の縮約法のイメージ

### 3.2 地震応答解析モデルへ設定する有効質量

今回工認に用いるサプレッションチェンバの地震応答解析モデルを図3に示す。また、通常運転水位条件による水平（X方向）及び鉛直（Z方向）方向の地震応答解析モデルの各質点位置に縮約される有効質量を表1及び表2、重大事故等時水位条件によるものを表3及び表4に示し、今回工認に用いるサプレッションチェンバの地震応答解析モデルに設定する有効質量（並進質量及び回転質量）が有する意味合いを重大事故等時水位条件のものを用いて以下に示す。

#### (1) 並進質量

- ・ X方向の各質点の並進質量  $m_x$  の合計値  kg は、サプレッションチェンバ内部水の有効質量を表し、Z方向の各質点の並進質量  $m_z$  の合計値  kg は、サプレッションチェンバ内部水の全質量を表すことから、有効質量比は、0.33（=) となる。
- ・ この有効質量比は、本文表4.1-1における仮想質量法による実機解析モデル（重大事故等時水位）の有効質量比0.33と一致する。
- ・ X方向の並進質量  $m_x$  は、X軸方向（質点1,17）がY軸方向（質点9,25）よりも質量が集中する傾向があり、流体解析コードOpenFOAMによる圧力分布（別紙4 図3.2-1参照）とも整合している。
- ・ X方向の並進質量  $m_y$ ,  $m_z$  及びZ方向の並進質量  $m_x$ ,  $m_y$  は、サプレッションチェンバの容器形状（軸対称）に応じた分布となっており、それぞれの合計値は0となる。

#### (2) 回転質量

- ・ X方向の各質点の回転質量  $Rm_y$  は、サプレッションチェンバの容器内面に加わる圧力（各シェル要素のX方向成分及びZ方向成分）を各質点位置にオフセットした場合の等価な回転慣性力を表している。
- ・ 各質点での回転質量  $Rm_y$  は、サプレッションチェンバの容器中心位置（はりモデルの質点位置）を基準としているため、回転質量が負の場合は容器中心位置よりも高い位置に、回転質量が正の場合は容器中心位置よりも低い位置に内部水の等価高さがあるとみなすことができる（円筒容器に対する検討結果は、「4.1.2 妥当性確認結果」参照）。
- ・ 今回の地震応答解析モデルにおけるX方向の各質点位置の回転質量の合計値は正であるため、サプレッションチェンバ内部水の有効質量の等価高さは、容器中心位置よりも高い位置にあることを表している。
- ・ X方向の有効質量（並進質量  $m_x$ ）の合計値  kg とX方向の回転質量  $Rm_y$  の合計値  kg・m から、サプレッションチェンバ内部水全体を簡便に一質点とした場合の等価高さは、サプレッションチェンバの容器中心位置（はりモデルの質点位置）から約  m 高い位置にあると算出される。
- ・ これは、内部水の重心位置（容器中心位置から下方に約  m の位置）よりも高く、Housner理論による底面圧力を考慮した円筒容器の評価式における容器水位に対する容器半径が比較的大きい場合の傾向とも整合する。
- ・ X方向の回転質量  $Rm_x$ ,  $Rm_z$  及びZ方向の回転質量  $Rm_x$ ,  $Rm_y$ ,  $Rm_z$  は、隣り合う質点の関係



として回転質量の増減が現れるが、これは質点位置の容器形状の違い（直管部：偶数の質点，接続部：奇数の質点）によるものであり，容器形状が軸対称であるため，それぞれの合計値は，ほぼ0となる。



図3 サプレッションチェンバ地震応答解析モデル

表 1 縮約した有効質量（通常運転水位，X 方向）

| 質点<br>番号 | 並進質量                         |                              |                              | 回転質量                              |                                   |                                   |
|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|          | $m_x$<br>( $\times 10^3$ kg) | $m_y$<br>( $\times 10^3$ kg) | $m_z$<br>( $\times 10^3$ kg) | $Rm_x$<br>( $\times 10^3$ kg · m) | $Rm_y$<br>( $\times 10^3$ kg · m) | $Rm_z$<br>( $\times 10^3$ kg · m) |
| 1        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 2        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 3        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 4        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 5        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 6        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 7        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 8        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 9        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 10       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 11       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 12       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 13       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 14       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 15       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 16       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 17       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 18       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 19       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 20       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 21       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 22       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 23       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 24       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 25       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 26       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 27       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 28       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 29       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 30       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 31       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 32       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 合計       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |

表2 縮約した有効質量（通常運転水位，Z方向）

| 質点<br>番号 | 並進質量                         |                              |                              | 回転質量                            |                                 |                                 |
|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|          | $m_x$<br>( $\times 10^3$ kg) | $m_y$<br>( $\times 10^3$ kg) | $m_z$<br>( $\times 10^3$ kg) | $Rm_x$<br>( $\times 10^3$ kg・m) | $Rm_y$<br>( $\times 10^3$ kg・m) | $Rm_z$<br>( $\times 10^3$ kg・m) |
| 1        |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 2        |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 3        |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 4        |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 5        |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 6        |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 7        |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 8        |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 9        |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 10       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 11       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 12       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 13       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 14       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 15       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 16       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 17       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 18       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 19       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 20       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 21       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 22       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 23       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 24       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 25       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 26       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 27       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 28       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 29       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 30       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 31       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 32       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |
| 合計       |                              |                              |                              |                                 |                                 |                                 |

表 3 縮約した有効質量（重大事故等時水位，X 方向）

| 質点<br>番号 | 並進質量                         |                              |                              | 回転質量                              |                                   |                                   |
|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|          | $m_x$<br>( $\times 10^3$ kg) | $m_y$<br>( $\times 10^3$ kg) | $m_z$<br>( $\times 10^3$ kg) | $Rm_x$<br>( $\times 10^3$ kg · m) | $Rm_y$<br>( $\times 10^3$ kg · m) | $Rm_z$<br>( $\times 10^3$ kg · m) |
| 1        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 2        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 3        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 4        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 5        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 6        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 7        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 8        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 9        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 10       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 11       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 12       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 13       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 14       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 15       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 16       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 17       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 18       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 19       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 20       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 21       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 22       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 23       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 24       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 25       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 26       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 27       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 28       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 29       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 30       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 31       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 32       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 合計       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |

表 4 縮約した有効質量（重大事故等時水位，Z 方向）

| 質点<br>番号 | 並進質量                         |                              |                              | 回転質量                              |                                   |                                   |
|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|          | $m_x$<br>( $\times 10^3$ kg) | $m_y$<br>( $\times 10^3$ kg) | $m_z$<br>( $\times 10^3$ kg) | $Rm_x$<br>( $\times 10^3$ kg · m) | $Rm_y$<br>( $\times 10^3$ kg · m) | $Rm_z$<br>( $\times 10^3$ kg · m) |
| 1        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 2        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 3        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 4        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 5        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 6        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 7        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 8        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 9        |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 10       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 11       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 12       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 13       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 14       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 15       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 16       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 17       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 18       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 19       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 20       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 21       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 22       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 23       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 24       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 25       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 26       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 27       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 28       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 29       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 30       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 31       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 32       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |
| 合計       |                              |                              |                              |                                   |                                   |                                   |

#### 4. Guyan の縮約法の妥当性確認

##### 4.1 自由表面を有する円筒容器評価モデルを用いた妥当性確認

###### 4.1.1 妥当性確認方針

NASTRAN による Guyan の縮約法の妥当性確認にあたっては、計算を簡単にするため、自由表面を有する円筒容器評価モデル(1 質点系)(質量位置の上下方向のオフセットの検討)として、NASTRAN の Guyan の縮約法(容器の重心位置に縮約)と NASTRAN を用いて FEM から直接的に求めた質点位置(有効質量に対する等価高さ)における有効質量、地震荷重及び回転質量を比較する。

また、参考として、Housner 理論による方法で求めた有効質量及び地震荷重も比較する。ここで、上記 3 つの手法による水平反力及び回転モーメントは、NASTRAN を用いて水平 1G 負荷による静的解析で算出している。

Housner 理論による方法では、容器半径に対する水位によって評価式が異なることから、容器半径と水位の関係を考慮した 2 つの評価モデルに対して妥当性検討を実施する。

(1) 評価モデル

評価は、ケース 1 として容器半径に対して水位が高いケース（水位/容器半径 $>1.5$ ）、ケース 2 として容器半径に対して水位が低いケース（水位/容器半径 $\leq 1.5$ ）と容器半径に対して水位が低いケース（ケース 2）の 2 ケース実施する。

それぞれの評価モデルを図 4, 5, 評価モデルの諸元を表 5, 6 に示す

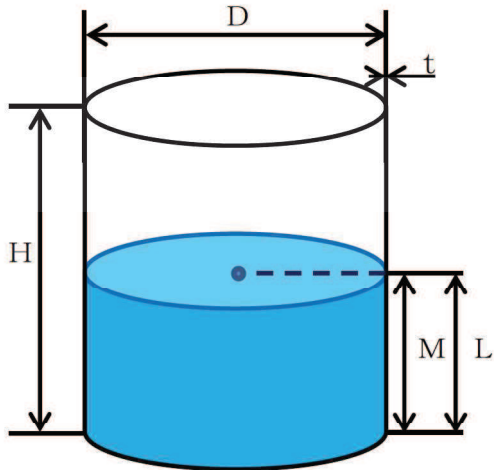


図 4 評価モデル（ケース 1）

表 5 評価モデル（ケース 1）の諸元

| 部位          | 寸法                      |
|-------------|-------------------------|
| 容器直径 D      | 1000mm                  |
| 容器板厚 t      | 50mm                    |
| 容器高さ H      | 2000mm                  |
| 容器重心高さ M    | 1000mm                  |
| 水位 L        | 1000mm                  |
| 水の密度 $\rho$ | $10^{-6}\text{kg/mm}^3$ |
| 水位/容器半径     | 2.0                     |

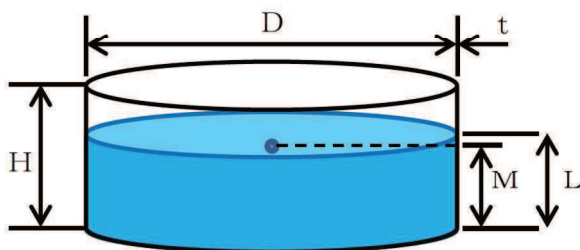


図 5 評価モデル（ケース 2）

表 6 評価モデル（ケース 2）の諸元

| 部位          | 寸法                      |
|-------------|-------------------------|
| 容器直径 D      | 4000mm                  |
| 容器板厚 t      | 50mm                    |
| 容器高さ H      | 1000mm                  |
| 容器重心高さ M    | 500mm                   |
| 水位 L        | 600mm                   |
| 水の密度 $\rho$ | $10^{-6}\text{kg/mm}^3$ |
| 水位/容器半径     | 0.3                     |

(2) 解析モデル

NASTRAN の評価に用いる解析モデルを図 6, 7 に示す。

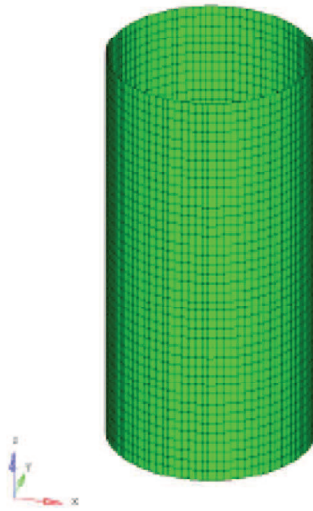


図 6 NASTRAN 解析モデル (ケース 1)

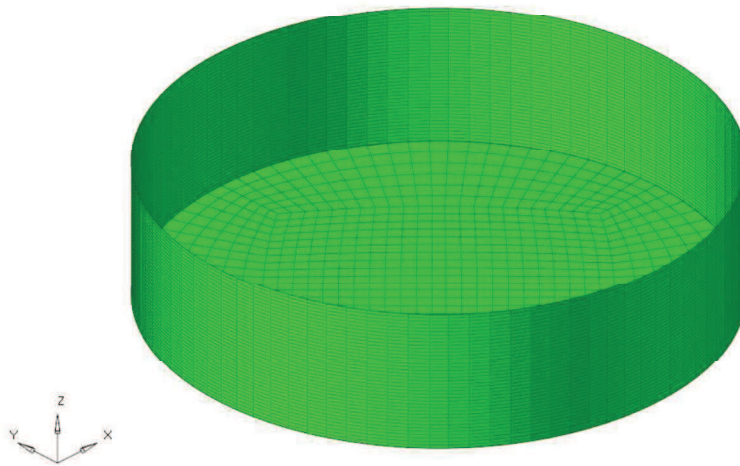


図 7 NASTRAN 解析モデル (ケース 2)



(3) 検討条件

検討条件を表 7、検討モデルのイメージを図 8 に示す。

表 7 検討条件

| 検討条件       | 検討モデル    |   |
|------------|----------|---|
|            | 容器のモデル化  | 内部水のモデル化                                |
| Guyan 縮約   | 1 質点系モデル | Guyan の縮約法により容器の質点位置に有効質量を付加            |
| 直接的評価      | 1 質点系モデル | NASTRAN を用いて FEM から直接的に求めた等価高さ*に有効質量を付加 |
| Housner 理論 | 1 質点系モデル | Housner 理論に基づく有効質量に対する等価高さ*に有効質量を付加     |

注記\* : Housner 理論による底面圧力を考慮した評価式を用いて等価高さを算出

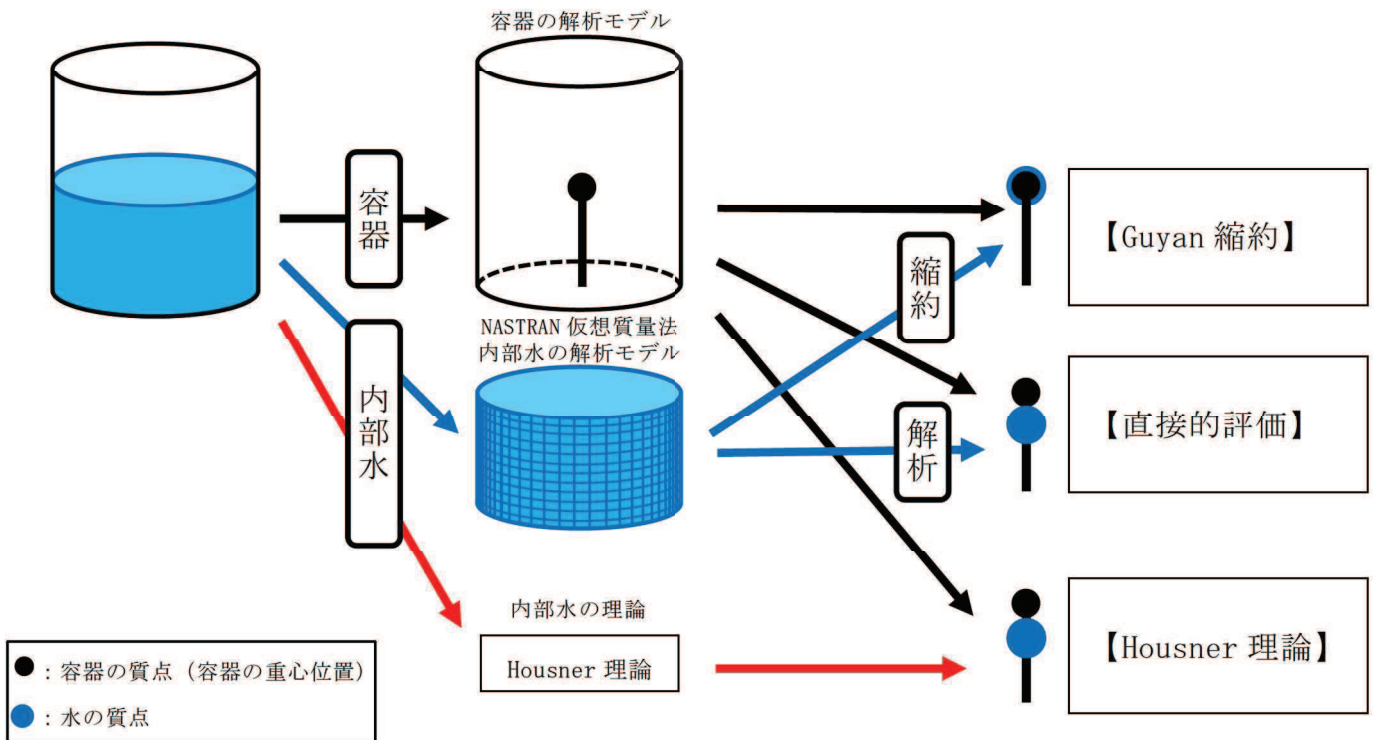


図 8 妥当性確認に用いる検討モデルのイメージ

#### 4.1.2 妥当性確認結果

NASTRAN の Guyan の縮約法と直接的評価による単位加速度 1G に対する有効質量，地震荷重及び回転質量を表 8，9，有効質量に対する水平反力等のイメージを図 9，10 に示す。比較結果から NASTRAN の Guyan の縮約法と直接的評価の有効質量，地震荷重及び回転質量は一致しており，NASTRAN の Guyan の縮約法が妥当であることを確認した。なお，容器重心位置と内部水の有効質量の等価高さの関係（オフセット方向）が回転質量の符号に考慮され，容器重心位置よりも内部水の有効質量の等価高さが低い場合（ケース 1）は負の回転質量となるが，容器重心位置よりも内部水の有効質量の等価高さが高い場合（ケース 2）は正の回転質量となる。

なお，Housner 理論による有効質量及び地震荷重も NASTRAN の Guyan の縮約法による有効質量及び地震荷重とほぼ一致していることを確認した。

表 8 Guyan による縮約法の妥当性確認結果（ケース 1）

|               | 有効質量<br>(kg)      | 等価高さ<br>(mm)      | 地震荷重 (1G)           |                     | 回転質量<br>(kg・m)         |
|---------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
|               |                   |                   | 水平反力<br>(N)         | 回転モーメント<br>(N・mm)   |                        |
| Guyan<br>縮約   | 603.591           | —                 | $3.010 \times 10^4$ | $2.714 \times 10^7$ | -302.613 <sup>*1</sup> |
| 直接的評価         | 603.591           | 498.646           | $3.010 \times 10^4$ | $2.714 \times 10^7$ | -302.613 <sup>*2</sup> |
| Housner<br>理論 | 614 <sup>*3</sup> | 506 <sup>*3</sup> | $3.021 \times 10^4$ | $2.723 \times 10^7$ | —                      |

注記\*1：Guyan の縮約法後の水の質量マトリクスにおける回転質量の値

\*2：直接的評価から求めた有効質量及び等価高さにより算定（図 9 参照）

\*3：評価式については，補足 1 参照

表 9 Guyan による縮約法の妥当性確認結果（ケース 2）

|               | 有効質量<br>(kg)       | 等価高さ<br>(mm)       | 地震荷重 (1G)           |                     | 回転質量<br>(kg・m)         |
|---------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
|               |                    |                    | 水平反力<br>(N)         | 回転モーメント<br>(N・mm)   |                        |
| Guyan<br>縮約   | 1236.927           | —                  | $6.050 \times 10^4$ | $4.467 \times 10^7$ | 1469.936 <sup>*1</sup> |
| 直接的評価         | 1236.926           | 1688.378           | $6.050 \times 10^4$ | $4.467 \times 10^7$ | 1469.936 <sup>*2</sup> |
| Housner<br>理論 | 1306 <sup>*3</sup> | 1657 <sup>*3</sup> | $6.118 \times 10^4$ | $4.541 \times 10^7$ | —                      |

注記\*1：Guyan の縮約法後の水の質量マトリクスにおける回転質量の値

\*2：直接的評価から求めた有効質量及び等価高さにより算定（図 10 参照）

\*3：評価式については，補足 2 参照

- : 内部水質量
- : 容器質量 (容器重心位置)
- ➡ : 水平反力
- ↻ : 回転モーメント
- ↻ : 回転質量

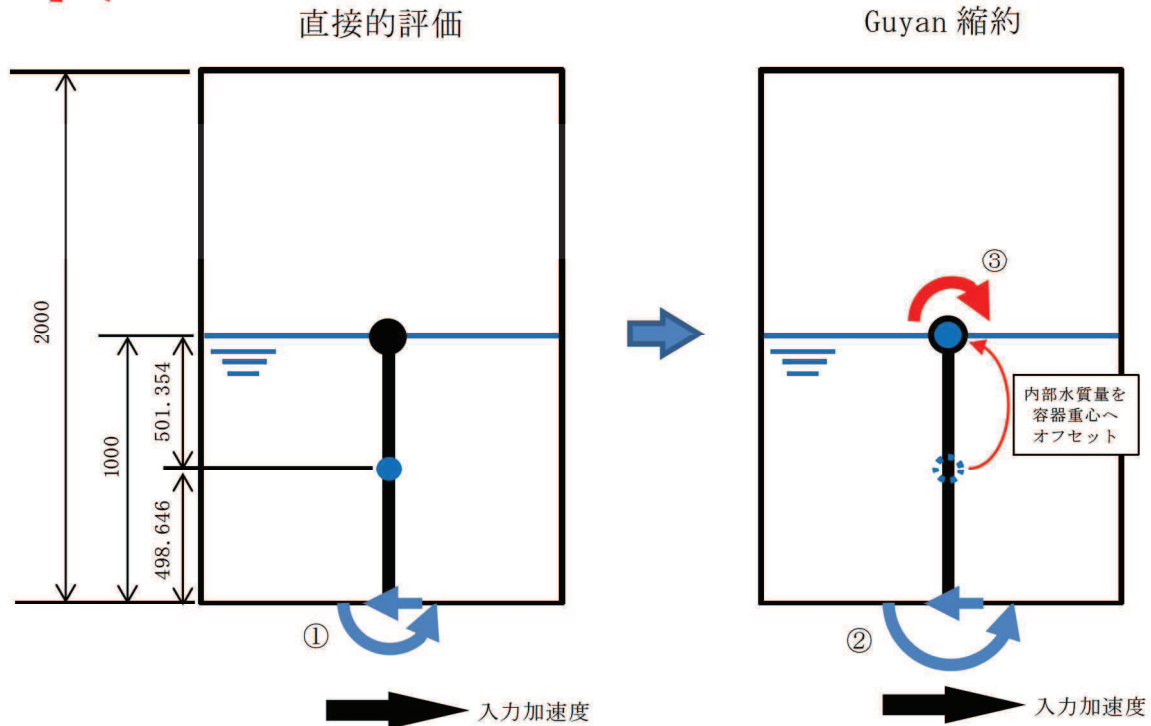


図9 有効質量に対する水平反力等のイメージ

#### ＜回転質量の算出（ケース1）＞

直接的評価による有効質量及び等価高さから回転質量を算出し、Guyan 縮約から求めた回転質量と比較する。

① 直接的評価による有効質量及び等価高さから容器底部での回転モーメントを算出。  
 $603.591 \times 0.498646 \times 9.80665 = 2,951.588 \text{ (N} \cdot \text{m)}$

② 直接的評価による有効質量を容器重心位置（Guyan 縮約による内部水質量の縮約位置）にオフセットし、容器底部での回転モーメントを算出。  
 $603.591 \times 1 \times 9.80665 = 5,919.206 \text{ (N} \cdot \text{m)}$

③ ①と②の回転モーメントの差を重力加速度で除した値が回転質量となる。  
 $(2,951.588 - 5,919.206) / 9.80665 = -302.613 \text{ (kg} \cdot \text{m)}$

上記回転質量 $-302.613 \text{ (kg} \cdot \text{m)}$ は、Guyan 縮約から求めた回転質量 $-302.613 \text{ (kg} \cdot \text{m)}$ と一致するため、内部水を Guyan の縮約によりはりモデルへ縮約する手法は、妥当である。

- : 内部水質量
- : 容器質量 (容器重心位置)
- ➡ : 水平反力
- ↻ : 回転モーメント
- ↻ : 回転質量

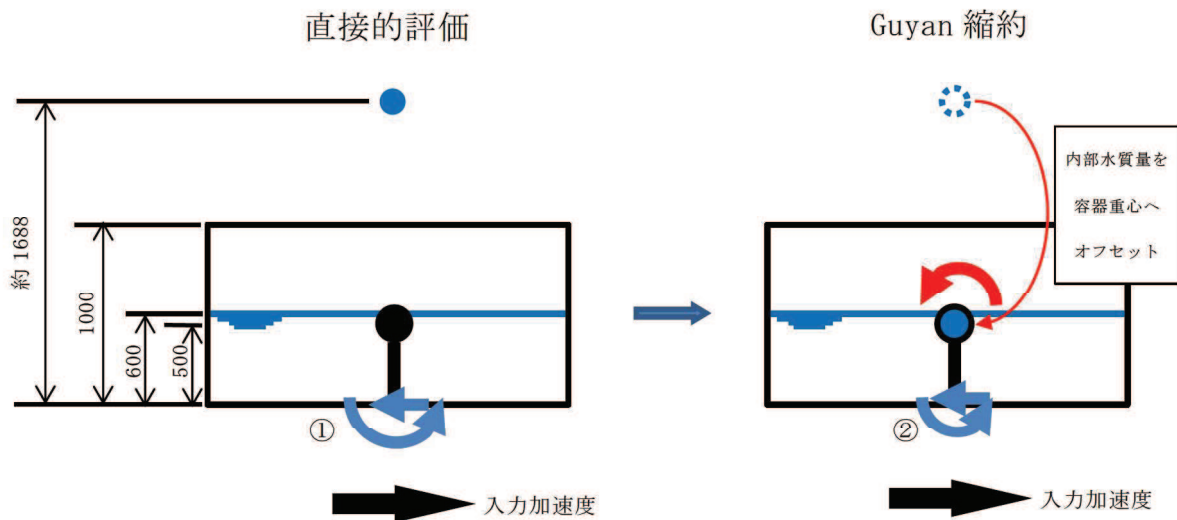


図 10 有効質量に対する水平反力等のイメージ

<回転質量の算出 (ケース 2) >

直接的評価による有効質量及び等価高さから回転質量を算出し、Guyan 縮約から求めた回転質量と比較する。

- ④ 直接的評価による有効質量及び等価高さから容器底部での回転モーメントを算出。

$$1236.926 \times 1.688378 \times 9.80665 = 20,480.195 (\text{N} \cdot \text{m})$$

- ⑤ 直接的評価による有効質量を容器重心位置 (Guyan 縮約による内部水質量の縮約位置) にオフセットし、容器底部での回転モーメントを算出。

$$1236.926 \times 0.5 \times 9.80665 = 6,065.050 (\text{N} \cdot \text{m})$$

- ⑥ ①と②の回転モーメントの差を重力加速度で除した値が回転質量となる。

$$(20,480.195 - 6,065.050) / 9.80665 = 1469.936 (\text{kg} \cdot \text{m})$$

上記回転質量 1469.936 (kg・m) は、Guyan 縮約から求めた回転質量 1469.936 (kg・m) と一致するため、内部水を Guyan の縮約によりはりモデルへ縮約する手法は、妥当である。

< 補足 1 >

Housner 理論による水の有効質量及び等価高さ (ケース 1)

Housner の論文<sup>[1]</sup>による手法を用いて、円筒タンクに対する水の有効質量及び等価高さについて算出する。

(1) 評価モデル

評価諸元を表 1、円筒タンクの概要図を図 1 に示す。

水位と容器半径の比が  $h/R=1000/500=2>1.5$  であるため、Housner<sup>[1]</sup>の論文 (6.5) の評価式から、 $h' = 1.5R$  とおき、 $h'$  より浅い部分と深い部分に分けて計算を行う。

表 1 評価諸元

|                               | 記号        | 値   | 単位 |
|-------------------------------|-----------|---|----|
| タンク半径                         | R         | 500   | mm |
| タンク底面から液面までの高さ                | h         | 1000  | mm |
| 1.5R (水面～ $h'$ )              | $h'$      | 750   | mm |
| $h'$ より深い部分の高さ<br>( $h'$ ～底面) | $h-h'$    | 250   | mm |
| 高さ $h'$ の流体質量                 | $W_o(h')$ | 589<br>( $\pi \times R^2 \times h'$ ) $\times$ 水密度* | kg |

注記\* : 水の密度は  $1 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$  とする。

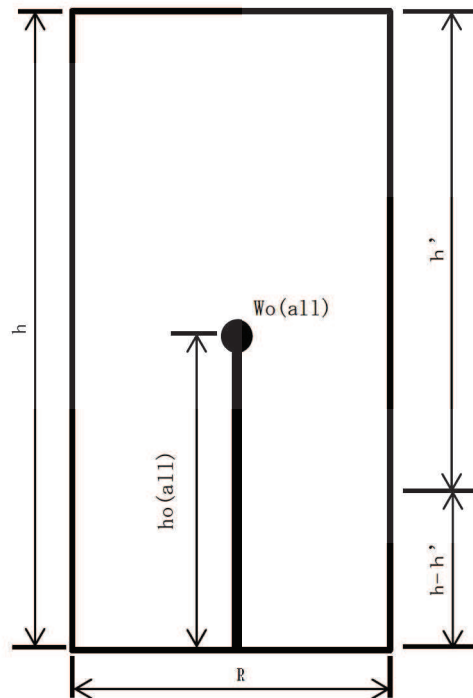


図 1 円筒タンク概要図

参考文献 [1] : Housner, G. W. : Nuclear Reactors And Earthquakes, TID Rep. 7024, 1963.

(2) 有効質量の算出

以下①～③式により、有効質量 $W_o(\text{all})$ を算出する。なお、タンク重量は含まないものとする。

$$W_o(h') = \frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)}{\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)} Wh' \quad \text{①}$$
$$= 418 \text{ kg}$$

$$W_o(h-h') = \pi \times R^2 \times (h-h') \times \rho \quad \text{②}$$
$$= 196 \text{ kg}$$

$$W_o(\text{all}) = W_o(h') + W_o(h-h') \quad \text{③}$$
$$= 418 + 196$$
$$= 614 \text{ kg}$$

(3) 等価高さの算出

以下④～⑥式により、等価高さ $h_o(\text{all})$ を算出する。

$$h_o(h') = (h-h') + \frac{h'}{8} \left\{ \frac{4}{\frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)}{\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)} - 1} \right\} \quad \text{④}$$
$$= 685 \text{ mm}$$

$$h_o(h-h') = \frac{h-h'}{2} \quad \text{⑤}$$
$$= 125 \text{ mm}$$

$$h_o(\text{all}) = \frac{W_o(h') \times h_o(h') + W_o(h-h') \times h_o(h-h')}{W_o(\text{all})} \quad \text{⑥}$$
$$= \frac{418 \times 685 + 196 \times 125}{614}$$
$$= 506 \text{ mm}$$

(4) 算出結果

(2), (3)の算出結果を表2に示す。

表 2 Housner の式で算出した水の有効質量及び等価高さ

|        | 記号      | 値   | 単位 |
|--------|---------|-----|----|
| 水の有効質量 | Wo(all) | 614 | kg |
| 水の等価高さ | ho(all) | 506 | mm |

<補足 2 >

Housner 理論による水の有効質量及び等価高さ（ケース 2）

Housner の論文<sup>[1]</sup>による手法を用いて、円筒タンクに対する水の有効質量及び等価高さについて算出する。

(1) 評価モデル

評価諸元を表 1、円筒タンクの概要図を図 1 に示す。

水位と容器半径の比が  $h/R=600/2000=0.3 < 1.5$  であるため、Housner<sup>[1]</sup>の論文（6.4）の評価式を用いて計算を行う。

表 1 評価諸元

|                | 記号    | 値  | 単位 |
|----------------|-------|--|----|
| タンク半径          | R     | 2000   | mm |
| タンク底面から液面までの高さ | h     | 600  | mm |
| 高さ $h_0$ の流体質量 | $W_0$ | 7540<br>$(\pi \times R^2 \times h') \times \text{水密度}^*$ | kg |

注記\*：水の密度は  $1 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$  とする。

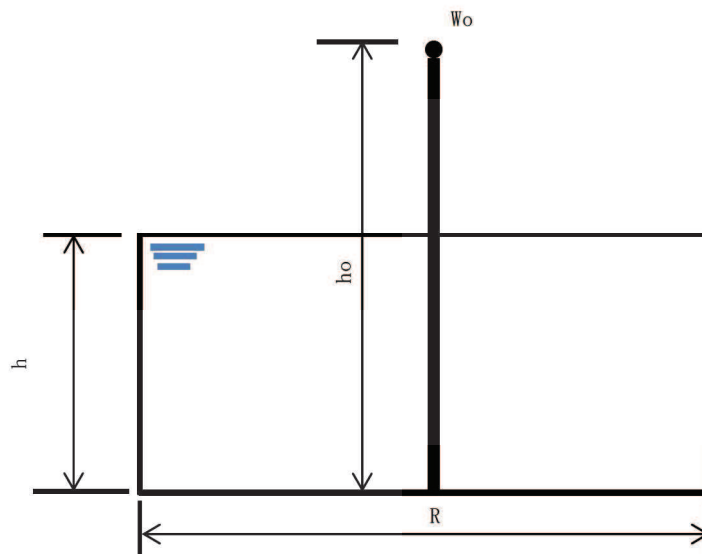


図 1 円筒タンク概要図

参考文献 [1] : Housner, G. W. : Nuclear Reactors And Earthquakes, TID Rep. 7024, 1963.



(2) 有効質量の算出

下式により、有効質量 $W_o$ を算出する。なお、タンク重量は含まないものとする。

$$W_o = \frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)}{\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)} W$$
$$= 1306 \text{ kg}$$

(3) 等価高さの算出

下式により、等価高さ $h_o$ を算出する。

$$h_o = \frac{h}{8} \left\{ \frac{4}{\frac{\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)}{\left(\sqrt{3}\frac{R}{h}\right)} - 1} \right\}$$
$$= 1657 \text{ mm}$$

(4) 算出結果

(2), (3)の算出結果を表2に示す。

表2 Housnerの式で算出した水の有効質量及び等価高さ

|        | 記号    | 値    | 単位 |
|--------|-------|------|----|
| 水の有効質量 | $W_o$ | 1306 | kg |
| 水の等価高さ | $h_o$ | 1657 | mm |

## 4.2 振動試験データを用いた妥当性確認

### 4.2.1 妥当性確認方針

サプレッションチェンバの地震応答解析モデルにおいては、内部水の等価高さを適切に考慮するため、NASTRANの機能であるGuyan縮約法により縮約した有効質量を3次元はりモデルの質点位置に設定しており、NASTRANのGuyan縮約法を用いて縮約した水平方向の有効質量については、「3. 地震応答解析モデルへの設定方法」にて、Guyan縮約法を適用していない仮想質量法（3次元シェルモデル）から算出した水平方向の有効質量と同等であることを確認している。

また、「4.1 自由表面を有する円筒容器評価モデルを用いた妥当性確認」にて、円筒容器におけるGuyan縮約法を用いて縮約した質量（有効質量及び回転質量）及びそれによる地震荷重について、3次元シェルモデル及び理論的に求めた質量（有効質量及び回転質量）及び地震荷重と同等であることを確認している。

ここで、円筒容器等をモデル化する手法として用いられるHousner理論における円筒容器等の評価式では、有効質量及び等価高さを以下のとおり算定している。

- ① 有効質量は、水平方向の加速度による内部水から受ける容器側面圧力（水平方向の圧力）から算定
- ② 等価高さは、上記①の有効質量と容器側面圧力（水平方向の圧力）による回転モーメントから算定
- ③ 容器半径に対して水位が低い場合の等価高さは、上記②に加えて、底面圧力（鉛直方向の圧力）による回転モーメントから算定される高さを加算

上記③における等価高さの取り扱い及び「3.2 地震応答解析モデルへ設定する有効質量」における等価高さが内部水の重心位置よりも高いことを考慮すると、サプレッションチェンバ内部水から受ける容器側面圧力（水平方向の圧力）に加えて底面圧力（鉛直方向の圧力）を把握することは重要である。

今回工認に用いる地震応答解析モデルでは、仮想質量法を用いて容器（各要素）の内面圧力（水平方向の圧力、鉛直方向の圧力）から各方向の有効質量を算定しており、これらはGuyan縮約法を用いてサプレッションチェンバのはりモデルの質点位置に縮約される。このため、鉛直方向の圧力に着目して、振動試験を模擬したNASTRAN（3次元シェルモデル）の鉛直荷重を確認し、振動試験の鉛直荷重との比較によりNASTRANによる鉛直方向の圧力の妥当性確認する。また、円環形状容器に対するGuyan縮約法の妥当性も確認するため、振動試験を模擬したNASTRAN（3次元はりモデル：Guyan縮約法を適用）による鉛直荷重を確認し、NASTRAN（3次元シェルモデル）及び振動試験の鉛直荷重と比較する。なお、本検討の目的について、表10のとおり整理した。

表 10 本検討の目的

|      |                    |                        |                                   |
|------|--------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 比較対象 | 3次元シェルモデル<br>/振動試験 | 3次元シェルモデル<br>/3次元はりモデル | 3次元はりモデル<br>/振動試験                 |
| 検討目的 | 鉛直方向の圧力<br>の妥当性確認  | Guyan 縮約法<br>の妥当性確認    | 鉛直方向の圧力<br>及び Guyan 縮約法<br>の妥当性確認 |

(1) 解析モデル

振動試験データを用いた検討を行うため、解析モデルは、実機を縮小模擬した振動試験体とし（図 11）、3次元シェルおよび3次元はりにてモデル化した（図 12 及び図 13）。振動試験体のモデル化に当たっては、振動試験体及び架台は、設計図面をベースとしてモデル化を行い、減衰定数は、JEAG4601 に記載の溶接構造物に対する設計用減衰定数 1% を適用した。

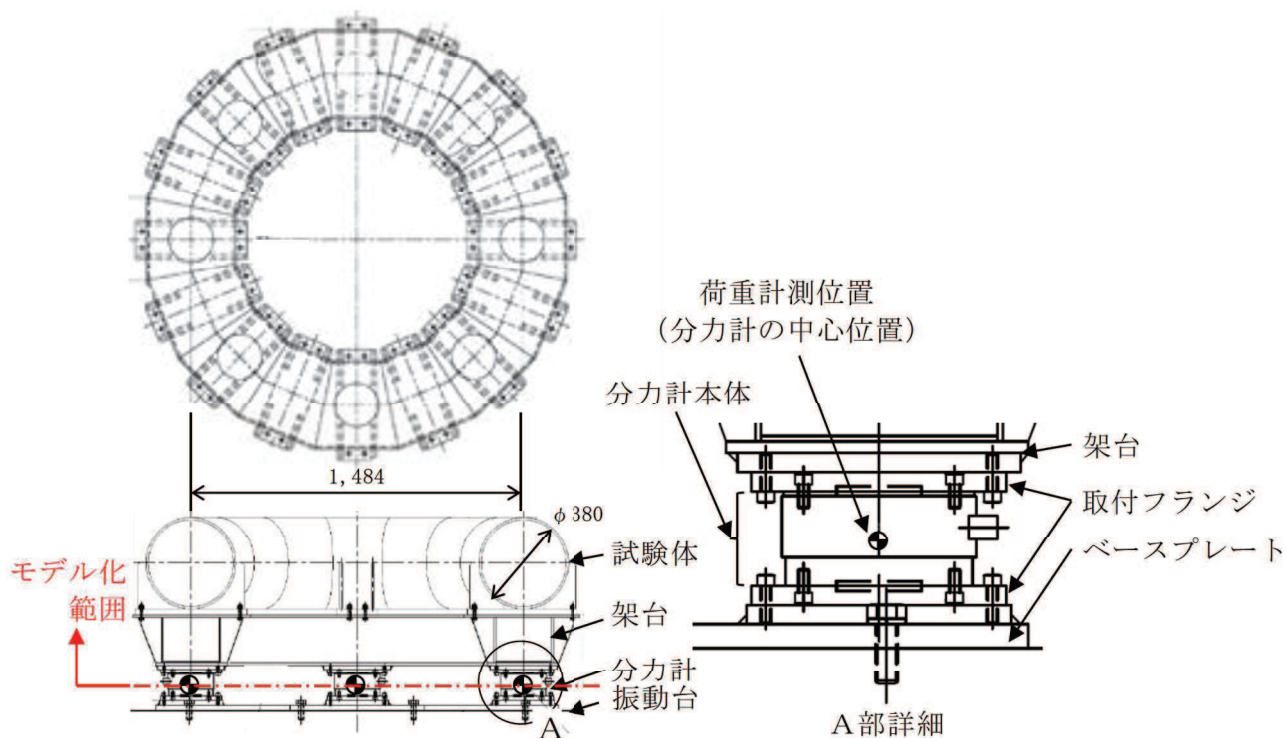


図 11 モデル化範囲

① 3次元シェルモデル

仮想質量法で算定した有効質量を試験体のシェル要素に付加した 3次元シェルモデル

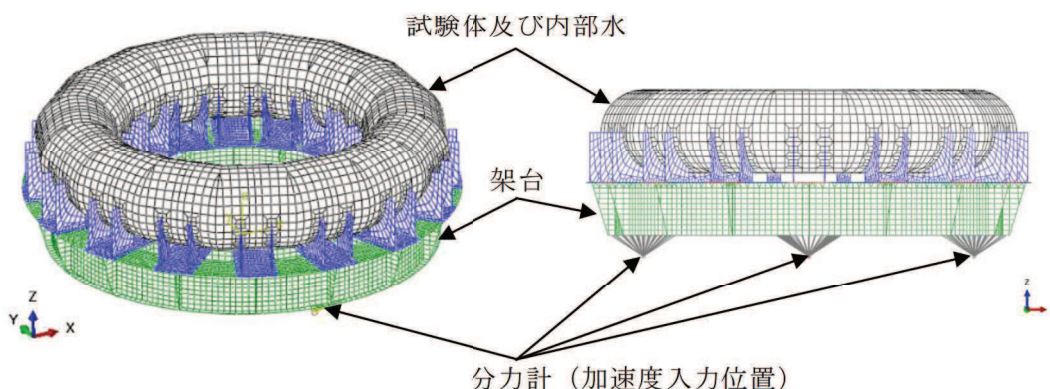


図 12 3次元シェルモデル

② 3次元はりモデル

仮想質量法で算定した有効質量を Guyan 縮約法を用いて試験体のはり要素に付加した 3次元はりモデル（今回工認におけるサプレッションチェンバの地震応答解析モデル設定と同様）

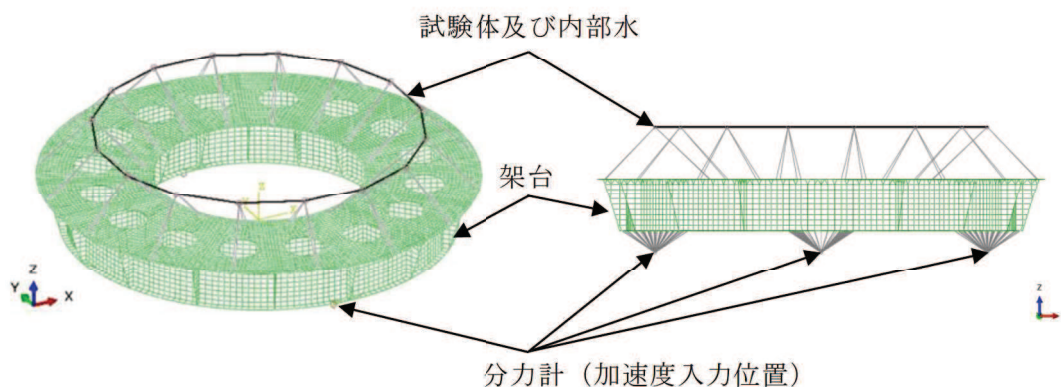


図 13 3次元はりモデル

(2) 解析条件

地震応答解析条件を表 11 に示す。

表 11 解析条件

| 項目            |     | 内容   |                         |
|---------------|-----|--|-------------------------|
| 解析モデル         |     | 3次元シェルモデル  | 3次元はりモデル                |
| モデル           | 試験体 | シェル要素  | はり要素                    |
|               | 架台  | シェル要素  |                         |
|               | 分力計 | 剛体要素<br>荷重計測位置（分力計の中心位置）～架台                          |                         |
| 内部水の有効質量の算定方法 |     | NASTRANの仮想質量法により有効質量を算定                              |                         |
| 内部水の有効質量のモデル化 |     | 試験体のシェル要素に付加   | Guyan縮約法を用いて試験体のはり要素に付加 |
| 減衰定数          |     | 1%（振動試験体，架台）   |                         |
| 境界条件          |     | 試験体と架台，架台と分力計：剛結合                                    |                         |
| 水位            |     | 高水位  |                         |
| 入力加速度         |     | 架台下端の加速度時刻歴<br>水平方向：0°，180°<br>鉛直方向：0°，90°，180°，270° |                         |
| 加速度入力位置       |     | 分力計の荷重計測位置（4箇所）                                      |                         |
| 解析コード         |     | NASTRAN  |                         |

(3) 入力加速度及び荷重比較対象

荷重計測位置よりも低い位置である振動台上で計測された加速度を用いて地震応答解析を行った結果、振動試験における試験体下端で計測された加速度よりも地震応答解析での試験体下端の加速度が小さいことを確認した。また、振動試験で計測した最大加速度及び加速度フーリエスペクトル比は、振動台上から架台下端、試験台上へ地震動が伝達するに従い増加しており、振動台上から架台下端までの増加が大きい（表 12、図 14）。この要因は、分力計の剛性に起因する共振（100Hz 付近）等による影響と考えられる。

今回の検討では、容器の内部水による底面圧力（鉛直方向の圧力）の妥当性確認を目的としているため、簡便な扱いとして、分力計のモデル化は行わず、分力計による応答増幅が含まれる架台下端で計測された水平及び鉛直方向の加速度を用いて多入力時刻歴応答解析を行う。なお、多入力時刻歴応答解析とすることで、鉛直方向のロッキング成分が模擬される。

地震応答解析における荷重の比較対象は、水平方向（X 方向）の加振に伴う内部水の有効質量による鉛直荷重は、加振直交方向（Y 方向）を軸として、加振方向（X 方向）に設置された分力計に作用するため、加振方向の分力計の荷重とした（図 15）。

表 12 最大加速度の比較

| 最大加速度 (Gal) |      |       | 最大加速度比 (-)  |              |
|-------------|------|-------|-------------|--------------|
| 振動台上        | 架台下端 | 試験体下端 | 架台下端 / 振動台上 | 試験体下端 / 振動台上 |
| 433         | 469  | 483   | 1.08        | 1.12         |

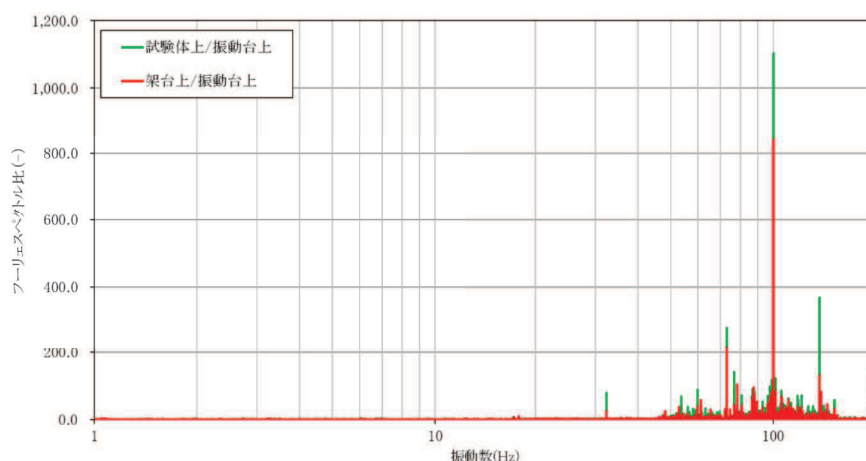


図 14 各計測位置における計測加速度のフーリエスペクトル比

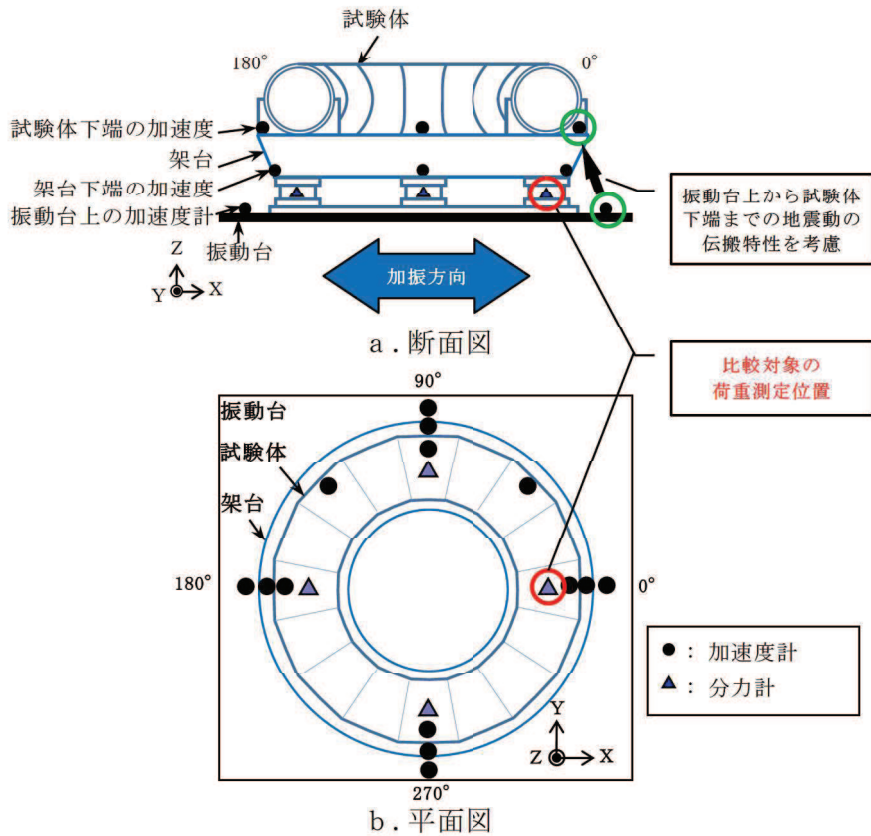


図 15 荷重の比較位置

#### 4.2.2 解析結果

##### (1) 試験体下端の加速度時刻歴

振動試験で計測された試験体下端の加速度時刻歴、3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる試験体下端の水平加速度時刻歴及び鉛直加速度時刻歴の比較を図16及び図17に示す。

比較の結果、3次元シェルモデル及び3次元はりモデルにて解析した試験体下端の加速度時刻歴は、振動試験で計測された試験体下端の加速度時刻歴とおおむね一致していることを確認した。

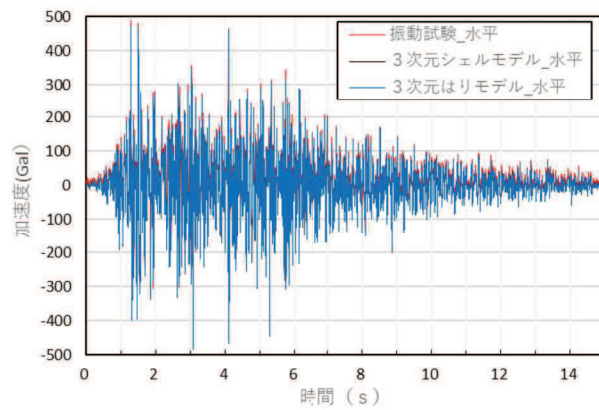
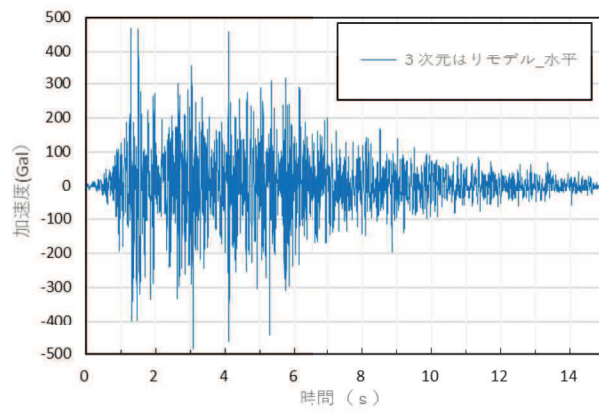
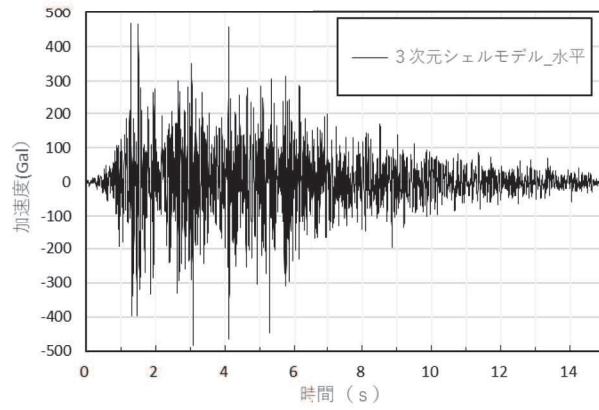
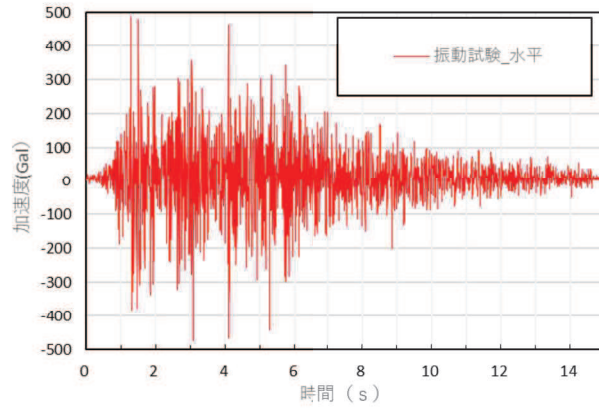


図 16 試験体下端の水平加速度時刻歴 (X 方向) の比較  
別紙 2-27