

### トラス型容器に作用する地震時動水圧分布の数値解析的検討

電力中央研究所	正会員	高畠 大輔	正会員	豊田 幸宏
中部電力	非会員	竹内 正孝	非会員	尾西 重信
東北電力	非会員	熊谷 信昭	非会員	飯田 純
電力計算センター	非会員	西田 瞬	正会員	石原 修二

#### 1. はじめに

沸騰水型原子炉発電所の原子炉格納容器には、大量の水を貯蔵するサプレッションプール（以下、SP）と呼ばれるトラス型容器が設置されており、事故時に生じる格納容器内の圧力上昇を防止する役割を有する。そのため、SPは地震時の健全性確保が求められており、耐震設計においては、内部水による地震時動水圧を評価する必要がある。

円筒タンクでは、既に地震時動水圧分布の解析解<sup>[1]</sup>が与えられ、それに基づいた耐震検討も行われている。一方、トラス型容器では動水圧分布の解析解は存在せず、実験や数値計算を用いる必要がある。そのため、数値計算結果の妥当性を示しておく必要性があり、それらに基づく動水圧分布の簡便式等の導出が望まれる。

本稿ではトラス型容器の振動実験と再現解析を実施した。再現解析ではオープンソースソフトウェア OpenFOAM<sup>[2]</sup>による数値流体計算を用い、実験結果と計算結果の比較により圧力算定の妥当性を示し、トラス型容器壁面に作用する地震時動水圧分布を算出した。

#### 2. 振動実験及び再現解析の方法

##### (1)振動実験の概要

トラス型容器の振動実験を実施した<sup>[3]</sup>。試験体の設置状況と寸法を図1に示す。試験体はアクリル製の16個の円筒を円環形に繋いだ形状で、円環の直径は1,484mm、断面内径は380mmである。振動台上には、容器を支持する鋼製の架台を設け、架台の脚部には水平・鉛直方向の荷重を計測するための分力計（LSM-B-10KNSB54）を90度間隔で4台設置した。さらに、容器の水平・鉛直加速度を計測するために振動台、架台および架台上面に加速度計（ASW-5A）を設置し、動水圧を計測するために容器内面に5個の水圧計（PGM-02KG）を設置した。

加振波形には0.1~2秒の成分が卓越する人工地震波

を用いた。加速度波形と速度応答スペクトル（減衰0.5%）を図2に示す。加振方向は図1に示す1方向とした。内容水には絵具で白色に着色した水道水を用いた。水位をパラメタとし、水位は内面底部から164mm（低水位）、218mm（中水位）、273mm（高水位）、315mm（高高水位）である。



図1 試験体および機器の設置状況と寸法

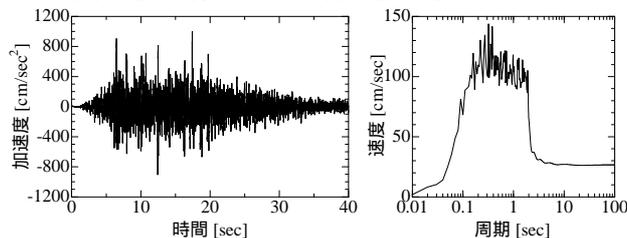


図2 加振波形の加速度時刻歴と速度応答スペクトル

##### (2)再現解析の概要

非圧縮性流体のVOFソルバー（OpenFOAM Ver.2.3.x）により振動実験の再現解析を実施した。モデル化の対象は容器内部で、乱流モデルはRNG k-εモデル、流体と固体の境界条件は不透過滑りなし条件とし、滑面对数則による壁面応力を考慮した。計算格子の解像度は、水平方向格子幅が約17mmで、全体で約15万格子である。再現解析では、実験で得た架台の加速度時刻歴を入力とし、容器壁面に作用する圧力やその積分値である荷重を計算した。

#### 3. 再現解析結果の妥当性

数値流体計算における圧力や荷重の算定値の妥当性を確認するため、これらの時刻歴波形を実験結果と比較する。なお、実験での荷重計測値には架台、容器に

作用する慣性力が含まれるため、この慣性力を加速度の計測値と架台、容器の質量を用いて算出し、荷重の計測値から差し引いている。

図3に実験、計算で得られた荷重と圧力の時刻歴波形を示す。同図には最大値、最小値およびその差(振幅値)を併記し、応答値が卓越する15~25秒間を拡大した。ここでは高水位の結果を代表として示した。実験結果に比べて計算結果がやや小さくなる傾向にあるが、計算結果は実験結果をよく再現できている。

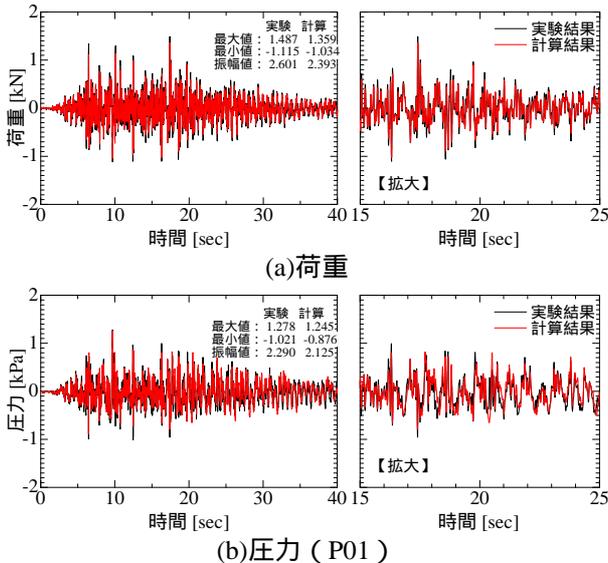


図3 時刻歴波形の比較(高水位)

### 4. トーラス型容器の動水圧分布

数値流体計算を用いて衝撃作用時におけるトーラス型容器の動水圧分布を算出した。衝撃力は正弦波1周期の加速度波形とし、振動数はスロッシングの1次固有振動数(低水位: 0.24Hz, 高水位 0.33Hz)よりも十分大きな10Hz、振幅は500, 1000, 2000galとした。

図4に加速度振幅1000galにおける動水圧および静水圧の分布を示す。同図には0度(加振方向), 45度, 90度(加振直交方向)の鉛直断面内の分布を示し、0度断面の各壁面における絶対値の最大値を示した。符号の定義は、容器外側に向かう動水圧を正とした。いずれの壁面においても、動水圧は水位の中間近傍で極大となる。低水位では、絶対値は異なるものの4つの壁面での動水圧は概ね等しいが、高水位では円環の外側の壁面の動水圧が、円環の内側に比べて大きくなる傾向にある。また、0度断面から90度断面に向かうにつれて動水圧は小さくなり、90度断面では概ね0となる。

図5に0度断面の各壁面における動水圧の絶対値の最大値と水位の関係を示す。同図では、断面内径を  $d$ 、

内容水の密度  $\rho$ 、加速度振幅を  $\alpha$ 、水位を  $h$ 、動水圧を  $p$  として、水位を  $h/d$  で、動水圧を  $p/\rho\alpha d$  で無次元化している。同図によると、円環外側の外壁面1や4では、水位に対し単調に増加しているが、内側の内壁面2や3では、高水位までは増加し高水位で減少する。また、内壁面に比べて外壁面の方が動水圧は大きくなる。なお、入力振幅による無次元動水圧への影響は水位による影響に比べて小さい。

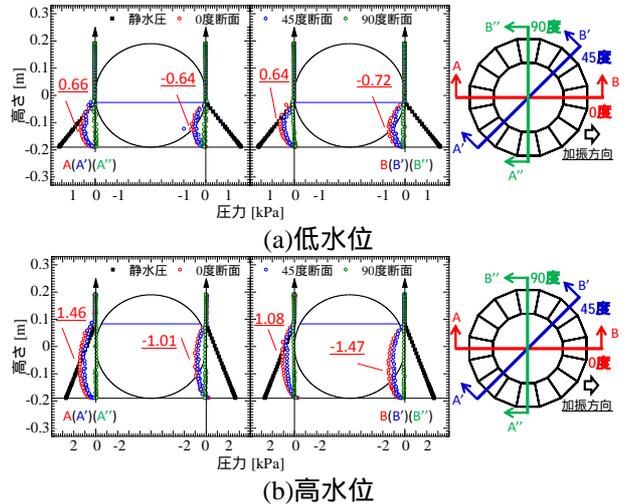


図4 動水圧分布(加速度振幅1000gal)

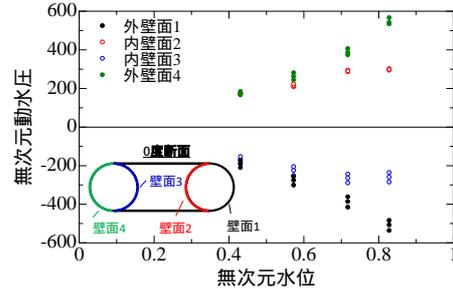


図5 水位と動水圧の関係

### 5. まとめ

OpenFOAMを用いた数値流体計算から算定されるトーラス型容器に作用する動水圧や荷重の妥当性を確認した。また、衝撃圧分布が水位の中間で極大となることや円環内側に比べ、外側の方が大きくなるのが計算結果により明らかとなった。今後は、動水圧分布のうち、衝撃圧分布の簡便式導出に向けた検討を行う。

### 参考文献

- [1] Housner, G. W.: Dynamic pressures on accelerated fluid containers, BSSA, Vol.47, pp.15-33, 1957
- [2] OpenFOAM Foundation, OpenFOAM Documentaion, <http://www.openfoam.org/docs/>
- [3] 竹内正孝 他:地震時におけるトーラス型容器内部水の有効質量の評価,日本機械学会2016年度年次大会, J1010106, 2016