

流体と構造の連成解析によるステンレス鋼製矩形水槽内の動水圧の検証

森松工業株式会社 正会員 ○青木 大祐, 行田 聡
愛知工業大学 正会員 鈴木 森晶

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震や熊本地震のような巨大地震後の調査で、矩形水槽の被害が報告されている¹⁾²⁾。これらは水槽の固有周期が地震の卓越周期と同調することによるもので、長周期地震動ではスロッシング振動、短周期地震動ではバルジング振動が発生する。スロッシングに関しては現象解明からその対応策まで数多くの研究が行われているが、バルジング振動においては水槽の側壁と流体の連成振動が複雑であり、その研究例は少ない。しかしながら、バルジング振動によって生ずる動水圧は非常に大きく、水槽破損の主因となる場合がある。

我国における水槽の設計基準は兵庫県南部地震の地震力を想定した震度法が採用されており、耐震設計は側壁に生ずる動水圧を Housner の近似式に基づいて行われている。ここで水槽は剛体と仮定されているが、ステンレス鋼製矩形水槽のような弾性体材料の場合、側壁が変形を伴って振動するので Housner の式とは異なる動水圧が発生するものと予想される。そこで本研究では、2 つの異なる地震波を用いて FEM による時刻歴応答解析を行い、動水圧を検証した。

2. 解析条件

解析モデルには、パネル構造形式のステンレス鋼製矩形水槽を用いた。加速度応答スペクトルでは固有周期により応答加速度も変化するので、解析モデルの固有周期に対する応答加速度を算出して、その影響を検討した。

2.1 固有値解

図-1 に、解析モデルを、以下に解析条件を示す。

- ① 解析モデル寸法：10 m×10 m×H6 m (水深：5.4 m)
- ② 解析コード：3次元有限要素解析ソフト ADINA
- ③ 水槽材料：SUS444, SUS304, SUS329J4L：1.5～3.0 mm
(密度 7,930 kg/m³, ヤング率 1.93×10^5 MPa, ポアソン比 0.3)
- ④ 要素：内容水-ポテンシャル要素 (密度 1,000 kg/m³)
側壁・天井・底板-シェル要素, 内部補強材-梁要素
- ④ 要素数：104,000, 100×100 メッシュ
(パネル1枚(1 m × 1 m)を100分割)

- ⑤ 拘束条件：水槽底面全面を固定 (回転自由)

2.2 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析では、JMA 神戸 NS および熊本地震 (前震) 益城町 EW の地震波を用い、時刻歴応答解析で一般的に用いられる数値積分: Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を使用した。減衰は質量と剛性に比例する Rayleigh 減衰 (5%) とし、解析ステップは 0.01 s とした。

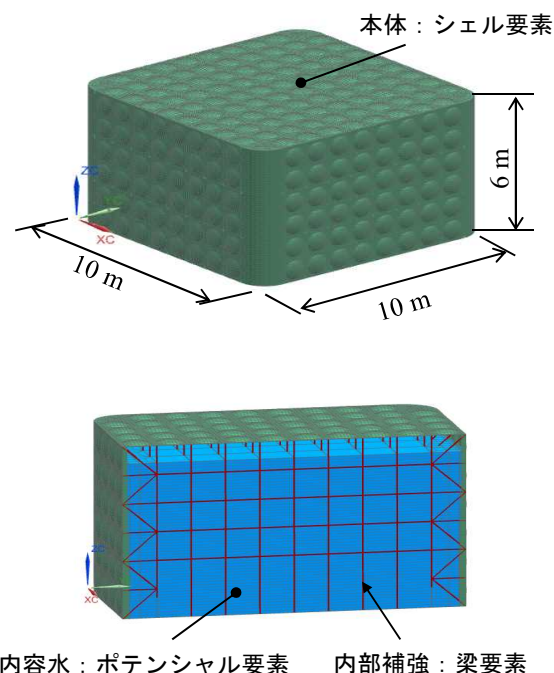


図-1 解析モデル (10 m×10 m×H6 m)

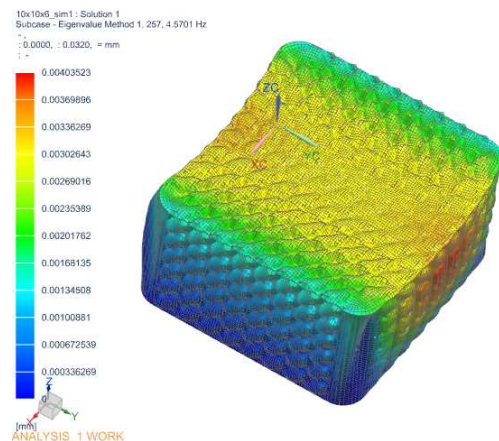


図-2 固有振動モード ($T=0.22$ s)

3. 解析結果

図-2 に、固有値解析により求めた本解析モデルの固有振動モードを示す。その時の固有周期は 0.22 s であり、水槽側壁の中央付近が外に変形し、反対側の側壁が内に変形するモードが確認される。

図-3 に、JMA 神戸および熊本地震の加速度応答スペクトルを示す。本解析モデルの固有周期である 0.22 s から応答スペクトルを算出すると JMA 神戸で 1,000 cm/s²、熊本地震で 2,700 cm/s² となる。

図-4 に、時刻歴応答解析で求めた両地震波における側壁に生ずる動水圧の水深分布を示す。なお、比較のために、 $K_h=1.0$ における Housner 式 (1) から求めた動水圧を併記した。

$$P = \sqrt{3} \gamma K_h h \left\{ \left(\frac{Y}{h} \right) - 0.5 \left(\frac{Y}{h} \right)^2 \right\} \tanh \left(\sqrt{3} \frac{L}{h} \right) \quad (1)$$

ここで、 γ は水の単位体積当たりの質量 (密度)、 K_h は設計水平震度、 h は水深、 Y は、水面からの深さである。Housner 式の結果では水槽底版に向かうにつれて水圧が増大するのに対し、FEM 解析で求めた水圧分布では中央付近の水圧が最大となる。この傾向は、固有値解析の結果でも見られた。JMA 神戸の解析値と Housner 式の水圧分布を比べると、動水圧の最大値は同程度であるものの、中央から上部にわたっては解析値が Housner 式よりも高い水圧となる。これは、ステンレス鋼製矩形水槽が弾性体であるので、側壁と水が連成振動することで側壁に変形を伴う水圧が作用しているためと考えられる。一方、熊本地震では、JMA 神戸波の 2 倍程度の動水圧が生ずる。これは、熊本地震の加速度応答スペクトルと解析モデルの卓越周期が近く、共振により発生するバルジング振動の影響が大きくなるためである。

4. おわりに

本研究では、流体と構造の連成解析によるステンレス鋼製矩形水槽内の動水圧を検証し、以下の結論を得た。静的解析で用いられる Housner 式と JMA 神戸の解析値を比較すると、ステンレス鋼製矩形水槽に生ずる動水圧は、最大値の発生位置は異なるものの、その値は同程度である。一方、熊本地震の前震のような短周期型の地震動では、水槽の固有周期と地震の卓越周期が同調することにより動水圧が Housner 式の 2 倍程度になり、設計荷重を超過することが危惧される。

今後の水槽設計では、固有周期と地震動の加速度応答スペクトルを考慮することが必要となる。特に短周期にピークを持つ地震動を想定する場合には、FEM 解析を実施して動水圧を算出すべきである。

参考文献

- 1) 井上涼介・坂井藤一・大峯秀一：2011 年東北地方太平洋沖地震における水槽の広域被害および地震動特性との関連の分析，土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, pp.I-764-773, 2015 年 4 月。
- 2) 井上涼介・坂井藤一・大峯秀一：2016 年熊本地震における水槽被害および地震動特性との関連について，土木学会論文集 A1, Vol.73, No.4, pp.I_711-720, 2017 年 9 月。

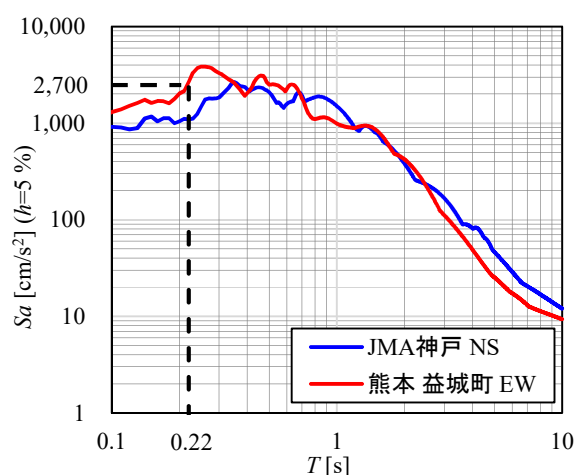


図-3 加速度応答スペクトル

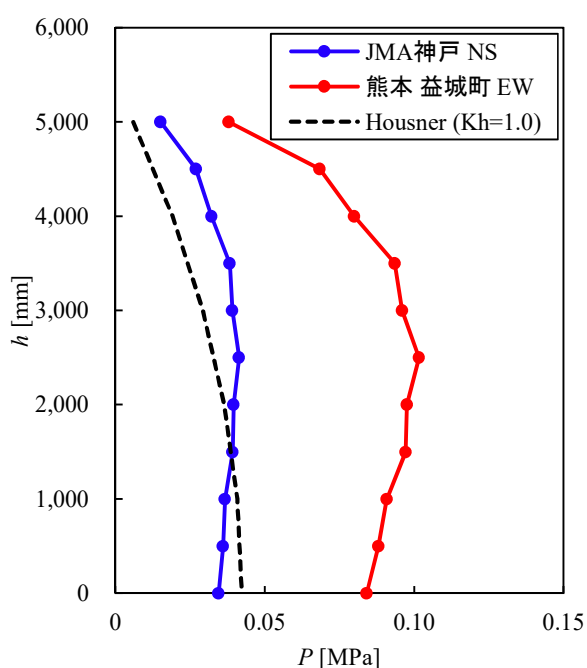


図-4 動水圧の水深分布