

地震動を受けるステンレス鋼製矩形水槽に生ずる動水圧に関する解析的研究 (その2, 修正震度法を用いた動水圧の計算法の提案)

森松工業株式会社 正会員 ○行田 聡
森松工業株式会社 正会員 増井 龍也
森松工業株式会社 正会員 青木 大祐

1. はじめに

我国の水道施設の設計基準では、水槽の側壁に生ずる動水圧は側壁を剛体と定義した Housner の近似式に基づいて算出されている。しかしながら、その側壁がステンレス鋼のように弾性体の場合、水と側壁の連成振動により側壁が変形するバルジング振動が発生するので、その動水圧は Housner 式からの計算値とは異なることが指摘されている¹⁾。

バルジング振動による動水圧は、変形圧と剛体圧の関係から求められる。剛体圧に関しては Housner の近似式として与えられているので簡便に求められるが、変形圧の算出にはそのような式がないので時刻歴応答解析などを用いなければならず、計算が非常に煩雑となる。矩形水槽における変形圧の簡便な計算法としては、井上ら²⁾が NASTRAN を用いて“モード解析法を利用した簡易法”として時刻歴応答解析による評価法を提案している。一方、修正震度法を用いた評価方法として、小林ら³⁾は刺激係数を考慮したより合理的な計算法を提案している。

そこで本研究では、ステンレス鋼製矩形水槽内の動水圧に及ぼすバルジング振動に対して、モード解析法を利用した修正震度法による簡便な動水圧の計算法を提案する。さらに、直接積分の時刻歴応答解析で求めた動水圧と比較することで修正震度法を用いた動水圧の計算法の妥当性を検討した。

2. 動水圧の計算法

変形圧は固有値解析から得られる固有振動数、刺激係数および固有ベクトル等を用いて求められる。本研究では固有値解析に ADINA を用いた。

地動加振を受ける水槽の非減衰の運動方程式は式(1)となる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = -\mathbf{M}_0\mathbf{1}\ddot{u}_g \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{X} は相対変位ベクトル、 \mathbf{M} および \mathbf{M}_0 は相対加速度および地動加速度に対応する等価質量マトリックス、 \mathbf{K} は剛性マトリックス、 \ddot{u}_g は地表面加速度

である。モード座標に関する運動方程式は式(2)で表される。

$$\ddot{\xi} + \omega_n^2\xi = -(\Phi^T\mathbf{M}\Phi)^{-1}\Phi^T\mathbf{M}_0\mathbf{1}\ddot{u}_g = -\beta_p\ddot{u}_g \quad (2)$$

ここで Φ は固有モードマトリックス、 ξ はモード座標ベクトル、 β_p は刺激係数ベクトル、 ω_n^2 は固有円振動数の自乗からなる対角マトリックスをそれぞれ表す。添字の n はモード次数である。加振される 1 自由度系の i 次モードの運動方程式は式(3)で表され、応答を考慮した i 次モードのモード座標は応答倍率 α を用いて表すと式(4)となる。

$$\ddot{\xi}_i + \omega_{ni}^2\xi_i = -\beta_{pi}\ddot{u}_g \quad (3)$$

$$\xi_{ia} = \alpha\beta_{pi}u_g \quad (4)$$

したがって、節点 j の i 次モードの応答動水圧 P_{nij} は、式(5)で与えられる。

$$P_{nij} = \Phi_{pij}\xi_{ia} = \alpha\Phi_{pij}\beta_{pi}u_g \quad (5)$$

Φ_{pij} は動水圧に関する節点 j の i 次固有モード値である。

次に修正震度法における動水圧の求解について考える。評価としては動水圧がすべて水槽の弾性変形の地震応答により表される場合と、剛体圧と変形圧の和として表される場合の2つが考えられる。設計水平震度を K_H とすれば、 α および u_g との間には次の関係がある。

$$K_H g = \alpha\omega_{ni}^2 u_g \quad (6)$$

(a) 動水圧がすべて水槽の弾性変形の地震応答による場合は、式(5)は式(7)と書き直される。

$$P_{1ij} = \Phi_{pij}\beta_{pi} K_H g / \omega_{ni}^2 \quad (7)$$

(b) 動水圧が剛体圧と変形圧の和として表される場合は、文献3)を参考にして式(8)で表される。

$$P_{2ij} = \Phi_{pij}\beta_{pi} (K_H - K_g)g / \omega_{ni}^2 + p_{Hj}K_g g \quad (8)$$

ここで $K_g g$ は地表面加速度、 $K_H g$ は応答加速度である。

3. 時刻歴応答解析との比較

3.1 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。以下に解析条件を示す。

解析モデル寸法：10 m×10 m×H6 m (水深：5.4 m)

解析コード：3次元有限要素解析ソフト ADINA

水槽材料：SUS444, SUS304, SUS329J4L：1.5～3.0 mm

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

時刻歴応答解析では，熊本地震（前震）益城町 NS の地震波を用い，数値積分：Newmark β 法（ $\beta=1/4$ ）を使用した。減衰は Rayleigh 減衰（5%）とした。

3.2 バルジング固有振動数

図-1 に，固有値解析により求めた 1 次バルジング固有振動モードを示す。この固有振動数は $f_1=4.557$ Hz，刺激係数は $\beta=494.79$ であった。

水槽側壁の中央付近が外側に大きく変形し，対称面の側壁が内側に変形するバルジング振動モードである。

3.3 動水圧の算定結果

修正震度法から求める動水圧と時刻歴応答解析の水圧値を比較する。

固有値解析から求められた 1 次バルジング固有振動数（ $f_1=4.557$ Hz (0.22 s)）と加速度応答スペクトル（図-2）を照合すると応答加速度は 27.0 m/s² となる。修正震度法に対してはこの値を用いた。

図-3 に， P_{1ij} ， P_{2ij} ，時刻歴応答解析および Housner の動水圧分布を示す。Housner の動水圧では底面付近で最大となるが， P_{1ij} ， P_{2ij} と時刻歴応答解析は中央付近が最大となっておりバルジング振動による影響が見られる。なお，本条件では P_{2ij} において良い一致が見られる。このことから，本提案式はバルジング振動による動水圧を良好に再現することが確認できる。

4. おわりに

本研究では，ステンレス鋼製矩形水槽内の動水圧に及ぼすバルジング振動に対して，修正震度法を用いた簡便で合理的な動水圧の計算法を提案した。また，時刻歴応答解析による結果との比較により，本計算法の妥当性が確認された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，「変形圧を考慮した動

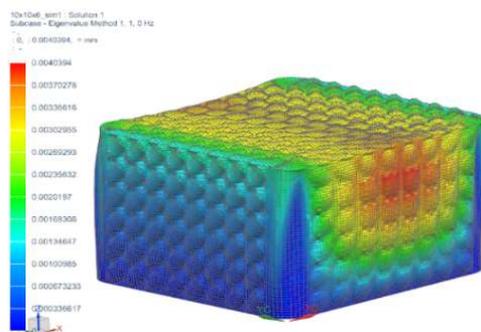


図-1 バルジング固有振動モード

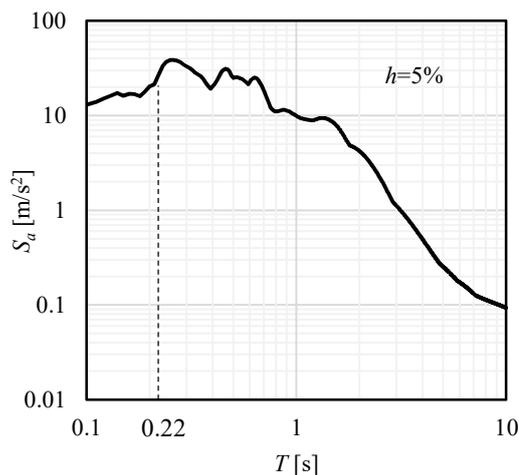


図-2 加速度応答スペクトル

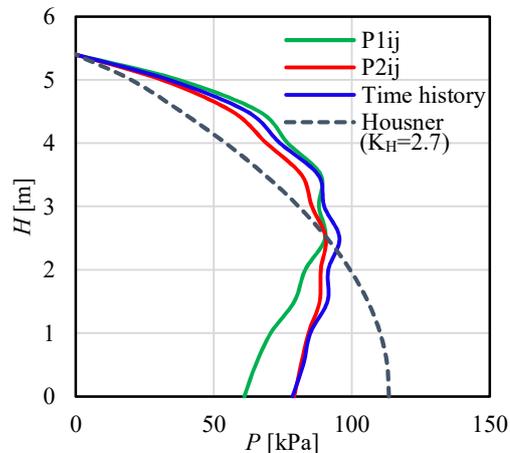


図-3 動水圧分布

水圧式」の導出に関しては，青山学院大学名誉教授・小林 信之 様から貴重な助言を頂きました。ここに，記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 井上涼介・坂井藤一・大峯秀一：矩形水槽におけるバルジング地震応答挙動の有限要素法解析，土木学会論文集 A1, Vol.75, No.4, pp.I_36-I_50, 2019.
- 3) 小林信之・大野卓志：平底円筒タンクに作用する地震時動液圧の評価－動液圧評価手法の提案－，圧力技術 Vol.59 No.1 pp.15-23, 2021.