

# 地震時における流体－構造－地盤の連成挙動に対する

## FLIP3D プログラムの適用性検証

上田恭平\*

### 1. 研究の目的

地震による地盤・構造物系の被害のひとつとして、貯水・貯油タンクに代表される内部に流体を有する構造物のスロッシング<sup>1)</sup>による被害が挙げられる。これまで、貯水タンク等の内部流体を有する構造物の地震時挙動を対象に、構造物下部に位置する地盤挙動の影響について実験的に調べた事例<sup>2)</sup>はあるものの、このような複雑な流体－地盤－構造物の連成挙動について3次元有効応力解析により検討した事例はほとんど見られない。そこで本研究では、液状化地盤上に設置された貯水タンクを対象に、地震時における流体－地盤－構造物の連成挙動を実験的に明らかにするとともに、3次元有効応力解析の適用性について検証することを目的とする。

### 2. 研究の方法

#### (1) 遠心模型実験

遠心模型実験には、京都大学防災研究所所有の遠心力载荷装置を使用した。幅 500 mm、奥行 250 mm の剛土槽内に、豊浦砂を用いて非液状化地盤

( $D_r = 90\%$ ：突き固め法)と液状化地盤 ( $D_r = 50\%$ ：空中落下法)を作製した(図-1)。その後、地盤全体を飽和させ、円筒型タンク(図-2)を地盤上に設置し遠心力载荷を行った。タンク内の材料をモデル A では流体、モデル B では固体とし、振動台を用いて土槽の長手方向に正弦波振動を与えることで、各モデルにおける連成挙動を比較した。

本研究では、地盤上の貯水タンクを対象としており、地震動によりタンク内の液面が揺動するスロッシング現象が発生する。スロッシングの固有角振動数 $\omega_{11}$ は、タンクの形状やタンク内の流体の水位によって以下のように求められる<sup>3)</sup>。

$$\omega_{11}^2 = 1.8412 \frac{g}{a} \tanh \frac{1.8412h}{a} \quad (1)$$

ここに、 $a$ はタンクの半径、 $h$ はタンク内の流体水位、 $g$ は重力加速度である。本研究で使用したタンクについて、式(1)より固有振動数を求めると $f_{11} = \omega_{11}/2 = 0.44 \text{ Hz}$ であり、与える正弦波の振動数をこの値とした。

#### (2) 3次元有効応力解析

3次元有効応力解析<sup>3)</sup>では、遠心模型実験で使用した模型のプロトタイプを対象とし、3次元有限要素メッシュを作製した(図-3)。初期自重解析を行った後、上記のスロッシングの固有振動数を含めた様々な正弦波振動を作用させ、連成挙動に及ぼす影響について考察した。なお、与える振動時間は振動数に応じて変化させ、正弦波の波数を各ケースで一一致させている。

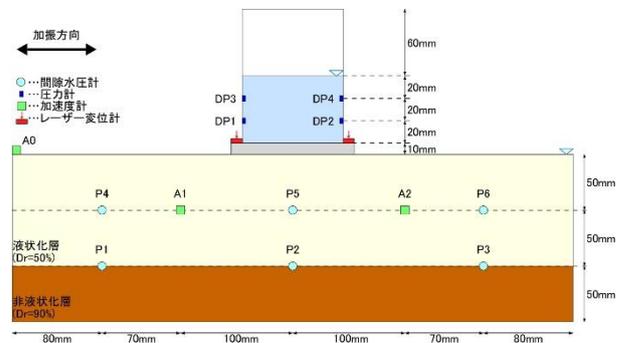


図-1 遠心模型実験の断面図

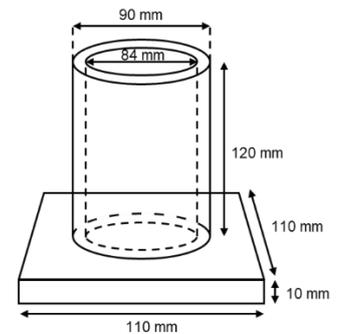


図-2 円筒型タンクの模型図

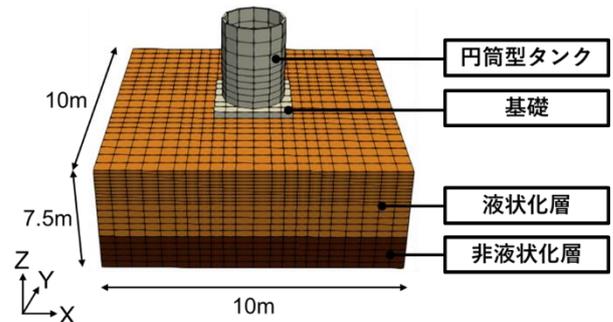


図-3 3次元有効応力解析のモデル

\*京都大学防災研究所・准教授

### 3. 得られた成果

図-4 に示すタンク（モデル A）の基礎における鉛直変位の時刻歴を見ると、実験と解析とで同等の結果が得られていることがわかる。また、タンク内の動水圧の応答より、実験と解析ともにスロッシングの発生が確認された。

次に、解析の各モデルにおける過剰間隙水圧比（出力位置は図-5 を参照）の考察を行う。タンク直下における深度毎の過剰間隙水圧比を比較した結果、図-6 に示すモデル A では局地的に過剰間隙水圧比の値が変動しているのに対し、図-7 のモデル B では局地的な変動がない。このことから、スロッシングに代表される流体の挙動が地盤挙動に影響を与えていると考えられる。

続いて、様々な振動数の正弦波を載荷したケースの考察を行う。図-8 および図-9 に、振動数毎の過剰間隙水圧比の比較を示す。P700 では、 $f_1 = 0.44 \text{ Hz}$  およびこれより大きな  $0.8 \text{ Hz}$  を与えた際、水圧比が変動を経た後に  $0.6$  程度に落ち着くのに対し、振動数が  $0.2 \text{ Hz}$  の場合は水圧比が  $1.0$  付近まで増加し続ける傾向にあった。一方の P725 では、振動数が  $0.8 \text{ Hz}$  の場合には水圧比が増減を繰り返しながら  $0.6$  程度に収束するのにに対し、 $0.44 \text{ Hz}$  の振動を与えた際は水圧比が  $0.9$  程度まで上昇し続けることがわかる。このことより、入力地震動の振動数が流体-地盤-構造物の連成挙動に大きく影響を及ぼすことが確認できた。

#### 参考文献

- 1) 小松敬治：スロッシング 液面揺動とタンクの振動，森北出版，2015.
- 2) Mpmbe, S.: Effects of fluid-soil-structure interaction on sloshing behavior during earthquakes, 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻修士論文，2017.
- 3) Iai, S., Ozutsumi, O.: Yield and cyclic behaviour of a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 29(4), 417-442, 2005.

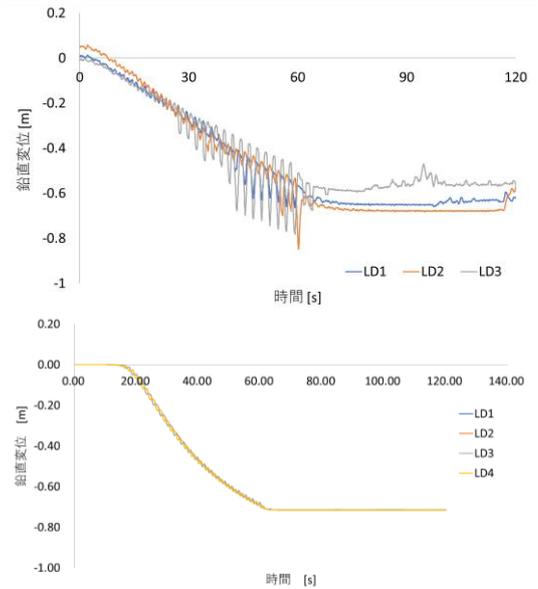


図-4 基礎の鉛直変位（上段：実験，下段：解析）

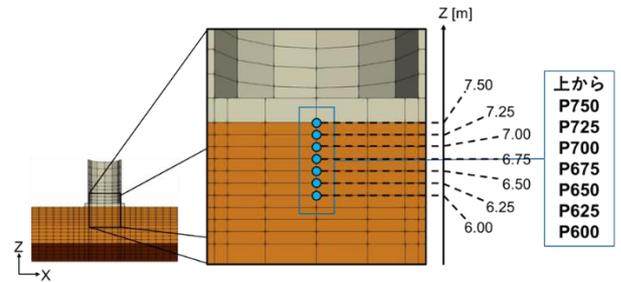


図-5 過剰間隙水圧比の計測位置

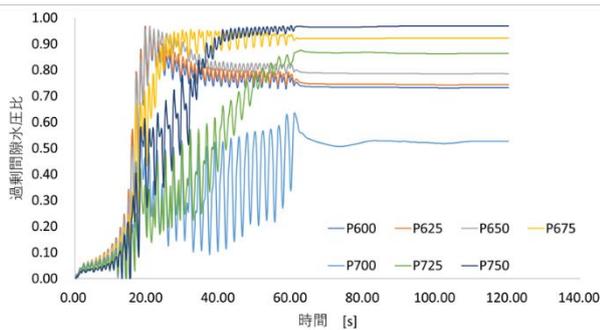


図-6 モデル A の過剰間隙水圧比

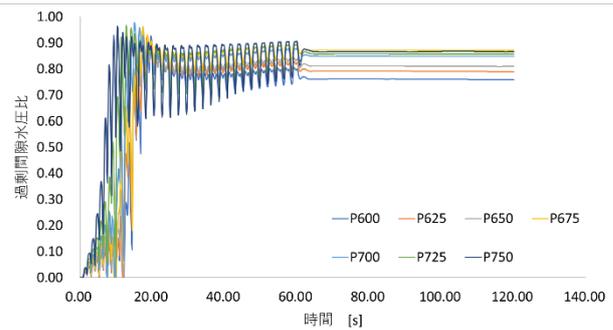


図-7 モデル B の過剰間隙水圧比

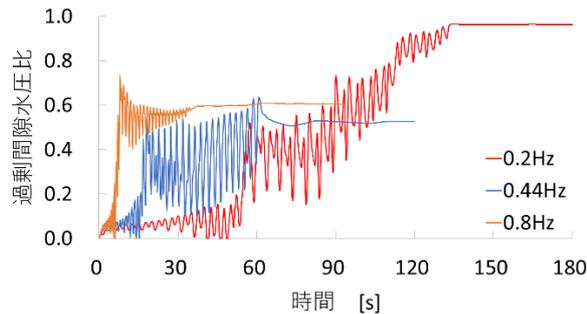


図-8 P700 のケース間の比較

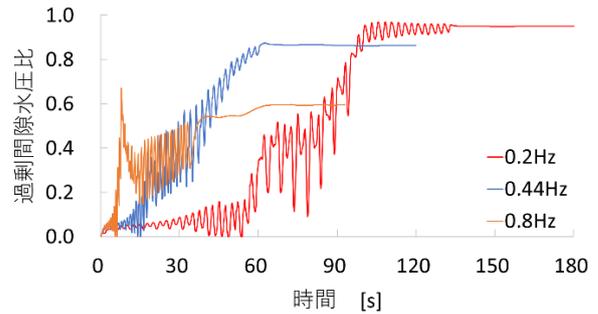


図-9 P725 のケース間の比較