

長周期地震動作用下での矩形水槽の非線形スロッシング評価

電中研 正会員 ○酒井理哉
電中研 正会員 佐藤清隆

電中研 正会員 東 貞成
電中研 正会員 田中伸和

1. はじめに

海溝型巨大地震が発生した場合、地震動の長周期成分は広い範囲に波動伝搬するため、大型タンクなどに生じる周期の長いスロッシング応答に対しては適切な評価法の整備が急務となっている。このため、矩形水槽の振動試験により、長周期地震動作用下での非線形スロッシングおよび溢水挙動に関する基本的データを取得する。また、VOF法に基づく数値流体解析コードを用いたシミュレーション解析を行い、試験結果との比較により溢水を伴うスロッシング評価に対する適用性を検証する。

2. 矩形水槽のスロッシング実験

図1に示す2重構造の矩形水槽（外側部：4m×2m×0.5m，内側部：2m×1.5m×0.5m）を用いたスロッシング実験を行った。内側水槽に上端から50mmまで水を満たし、水槽全体を水平方向に地震波加振することによりスロッシングを生じさせ、外側水槽に溢れる状況を評価する。主な計測項目は、スロッシング波高（3箇所）、隔壁に作用する動水圧（3箇所）、振動台および水槽の応答加速度で、アンプを介しデジタル収録装置を用いて動的計測を行った。また、隔壁上部側面にアクリル窓を設け、高速ビデオカメラを用いてスロッシングによる波の溢流状況を撮影し、画像処理により波面形状の分析を行った。内側水槽部には水深調整用の底板を用意し、水深を0.69m、1.45mの2ケース設定した。加振波は2003年十勝沖地震のk-net 苫小牧での観測記録を用い（図2）、速度応答スペクトルのピークが、水槽のスロッシング周期と一致するように時間軸を調整して入力した。

3. 実験結果

スロッシング波高の時刻歴波形を図3に示す。波高は最大150mmほど生じ、溢水による平均水位の低下とともに波高が減少する。水深が深いケースの方は減衰が小さく、加振終了後の液面揺動は長く続いた。壁面に作用する動水圧の時刻歴波形を図4に示す。動水圧は溢水による波高の低下により静水圧分が低下していく。また、最上点の水圧計は波高の上下により空中に露出するため、一定水位より下側は値が無くなっている。

4. VOF法による数値流体解析

電中研で開発したVOF法¹⁾に基づく2次元スロッシング解析

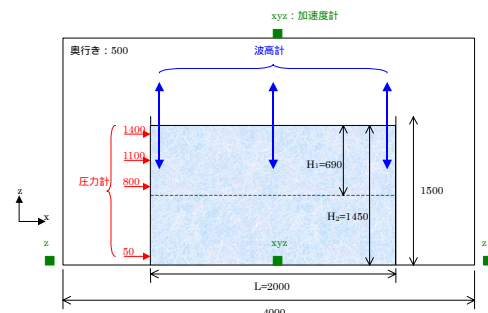


図1 水槽形状およびセンサー配置図

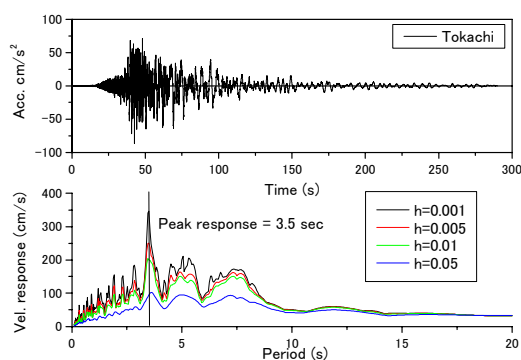


図2 入力地震動

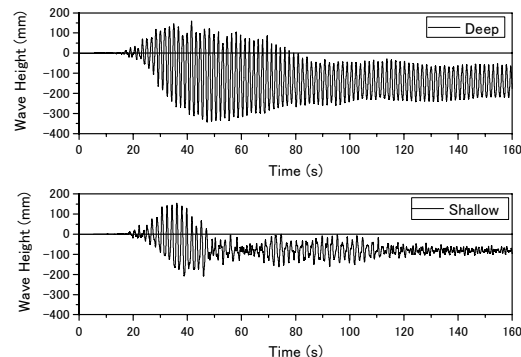


図3 波高時刻歴

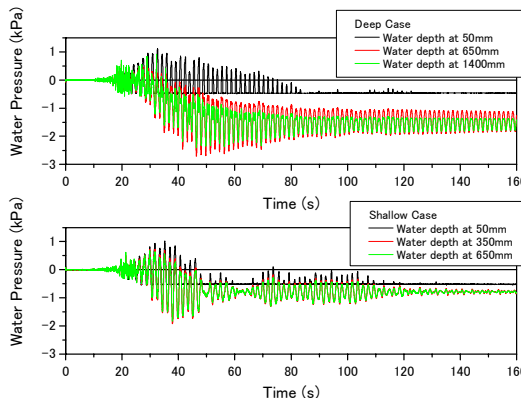


図4 動水圧時刻歴

キーワード 長周期地震動，スロッシング，溢水，数値流体解析，VOF法

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1 6 4 6 （財）電力中央研究所 地球工学研究所 TEL 04-7182-1181

コード SLOSH-2D を用いて試験シミュレーション解析を行った。SLOSH-2D は、自由液面を考慮できる 2 次元断面直交格子差分法による非圧縮性流体の乱流数値解析コードであり、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる乱流粘性の扱い、SIMPLE 法による質量保存の厳密化を行っている。

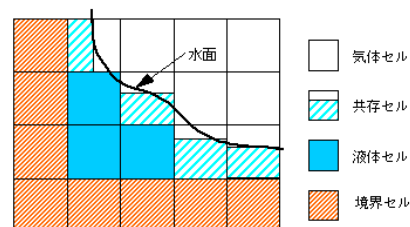


図5 VOF法の概念図

5. 解析コードの精度検証

解析モデルは、水平方向 2cm、鉛直方向 2.5cm の格子サイズで水槽全体を 149×149 に分割した。時間積分の刻み幅は、 $\Delta t = 0.002 \text{ sec}$ とし振動台上で計測された加速度波形を外力として入力した。波高および動水圧について、実験と数値解析の結果の比較を図 6、7 に示す。両者はよく一致しており、本解析手法による非線形スロッシング応答の評価精度が確認できた。時刻 $t = 33.3 \text{ sec}$ での、スロッシング波面の計測画像と数値解析による水面形状のスナップショットを図 8、9 に示す。溢水を伴う非線形スロッシング時の複雑な液面形状について一致した結果が得られている。従来ポテンシャル理論に基づく方法により保守的に波高が評価されてきたが、数値流体解析を用いることにより精緻に予測可能である。

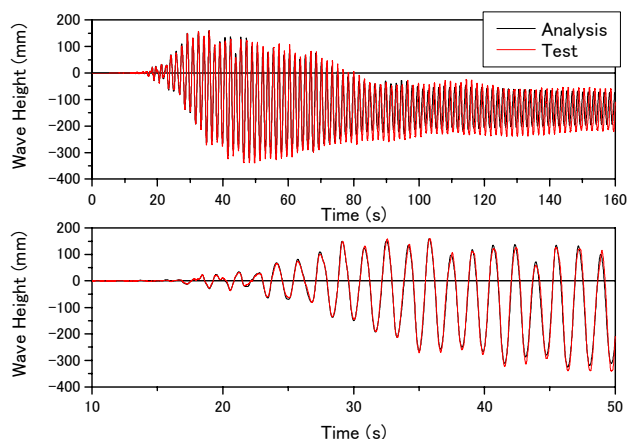


図6 波高の比較

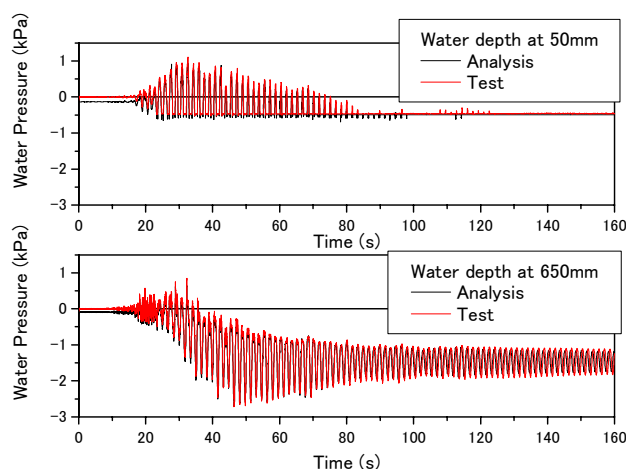


図7 動水圧の比較



図8 スロッシング波面撮影状況 $t = 33.3 \text{ sec}$

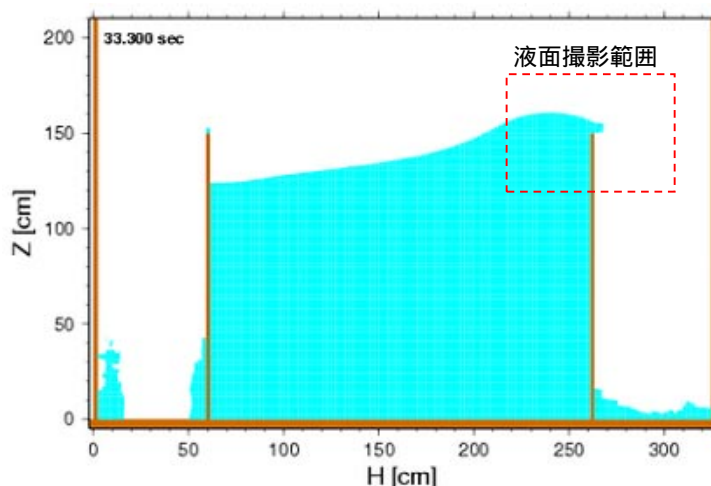


図9 水面変動のスナップショット $t = 33.3 \text{ sec}$

6. まとめ

矩形水槽のスロッシング実験により、溢流を伴う非線形スロッシング現象を把握した。電中研で開発した溢水を伴うスロッシング解析コード SLOSH-2D を用いた数値流体解析を実施し、非線形スロッシング挙動、波高および溢水量予測の精度の確認した。

参考文献

- 1) Hirt, C. and Nichols, B.D : Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, Jour. of Computational Physics 39, 201-225, 1981