

タンクのスロッシングに伴う浮屋根挙動の MPS 解析

富士ピー・エス 正会員 ○竹内裕彦
香川大学工学部 フェロー会員 野田 茂

1. まえがき

2003 年十勝沖地震では、スロッシングにより、苫小牧におけるタンクの浮屋根が損傷するとともに、我が国初の全面火災が発生した。その結果、消防法が改正され、浮屋根を含む構造体の強化が図られた。そこで本研究では、粒子法 (MPS 法) を用いてタンクと内溶液をモデル化し、流体と構造物 (浮屋根・タンク側壁) の連成解析を行い、浮屋根の有無・構造条件の相違が流体-構造物の連成効果、スロッシングに及ぼす影響を調べる。

2. MPS 法

MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法では、連続体をメッシュ分割するのではなく、自由に動く粒子の集まりとして表現する¹⁾。同法は非圧縮性粘性解析に適した計算アルゴリズムであり、砕波などの非線形現象を再現可能な解析手法として注目を集めている。

従来手法である有限要素法や差分法と比較すると、1) 完全ラグランジュ法であるので、2) メッシュ生成が不必要などの特徴がある。この利点より、自由液面の境界を特別なスキームなしに追跡できる。このため、安定した流体-構造物連成解析を実現できるようになる。MPS 法の歴史は浅く、土木・防災分野においてはこれまで流体-構造物連成解析への適用例が少ない。

ここでは、文献 1) を参考に、浮屋根を剛体、弾性体でモデル化したときのスロッシング挙動を調べる。

3. タンクのモデル化

モデル化に当たっては、浮屋根の有無、構造条件 (剛体・弾性体、強度)、液深をパラメトリックに変化させ、

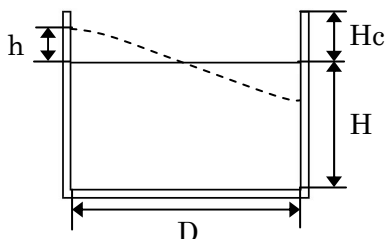


図1 2次元タンクのモデル化

2 次元モデルを対象にする。これらの相違が流体-構造物の連成効果、スロッシングや浮屋根の挙動に及ぼす影響を検討する。浮屋根部については、解析の都合上、ポンツーンなどのマイクロなモデル化をしない。

図1には2次元モデルを示す。図中のDはタンクの内径、Hは液深、Hcは空間余裕高さ、hはスロッシング波高である。浅いタンクと深いタンクではスロッシング現象が変化するので、図2に示すように3通りのH/Dパターンを設定する。

さらに、液深の変化に対応したスロッシング現象を解明するため、図3に示すように空間余裕高さも3通り想定する。空間余裕高さの規制値HcはH/Dによって決まる。空間高さは、空間余裕高さの規制値未満、規制値、規制値超過の3通りとする。

浮屋根については、浮屋根の有無の検討とともに、浮屋根の強度特性として、軟らかい弾性体、硬い弾性体、剛体を考える。

地震波入力としては正弦波を仮定する。その周期は、タンクのスロッシング挙動と共振するように、各タンクモデルの1次スロッシング周期とする。

4. スロッシングに伴う浮屋根挙動解析

図4は浮屋根がないタンク、図5は浮屋根が剛体タンク、図6は浮屋根が弾性体タンクにおける代表時点

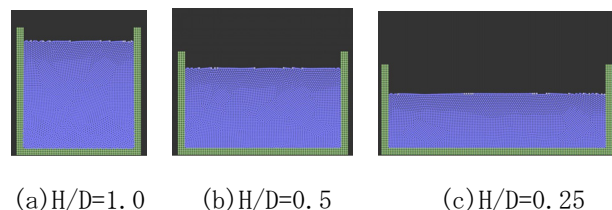


図2 解析対象タンクの内径と液深のパターン

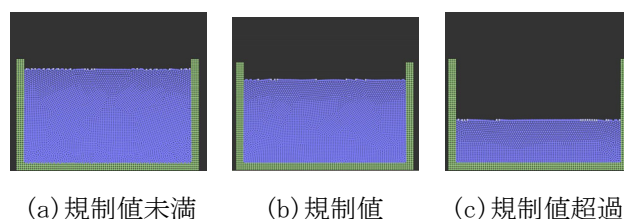


図3 解析対象とした空間余裕高さのパターン

キーワード MPS 法, タンク, 浮屋根, 連成解析, スロッシング

連絡先 〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20, Tel & Fax: 087-864-2153

のスロッシング挙動である。タンクは $H/D=0.5$ で、空間高さは空間余裕高さの規制値を超過している。

浮屋根がないと、自由表面の液面状態になる。そのため、地震入力波に対してスロッシングが成長することにより、 H/D や空間余裕高さが違っていると、内容液がタンクから溢流するケースがあった。MPS 法による粒子法の解析を導入した結果、スロッシングに伴う砕波や飛沫現象を的確に再現できることがわかった。

本解析では、液面と浮屋根の相互計算が可能なので、浮屋根がスロッシングにより液面と連動して動き出す様子が可視化できる。浮屋根があると、スロッシングは大きく抑えられた。浮屋根の有無により、スロッシングモードに変化が生じ、スロッシングには非線形挙動を呈することも多かった。

図に示すように、浮屋根が剛体であると、変形が許されないため、スロッシングは線形的挙動を呈す。浮屋根が弾性体になると、自由表面の状態に近い挙動を呈することになり、浮屋根のない状態におけるスロッシングの非線形性が見られ、スロッシングの成長に伴い、2次モード以上の高次モードが生起する特徴のある応答が発現した。モード変化やスロッシングの非線形性によっては浮屋根に大きな圧縮力や引張力が作用した。高次モードの励起したスロッシング挙動に起因し、浮屋根のたわみが大きくなることも明らかになった。

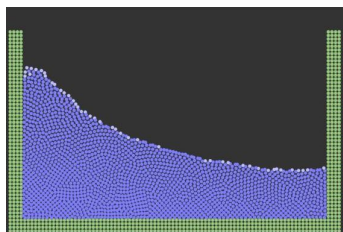


図4 浮屋根のないタンクのスロッシング

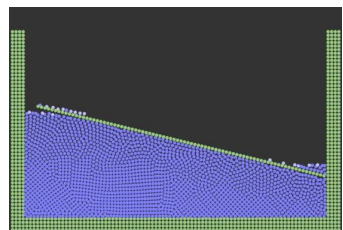


図5 剛体浮屋根タンクのスロッシング

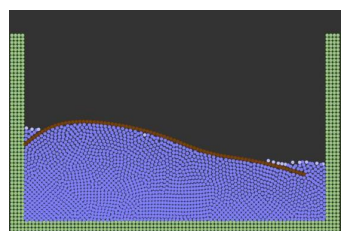


図6 弾性体浮屋根タンクのスロッシング

た。なお、本研究ではポンツーンなどをモデル化していないため、スロッシングに伴う浮屋根挙動に応じ、図5、図6のように、内容液が浮屋根とタンク側壁の隙間から流れ出る現象や浮屋根の大変形現象が見られる。MPS法によって流体-浮屋根構造の連成挙動が表現できていることが明らかになった。

実際には、タンク側面上で波高が最高となるわけではないが、タンク左側側面上における液面の変化量からスロッシング波高 h を計測し、その正規化時刻歴 h/H を調べると、図7 (図4～図6に相当) のようになる。

図から、浮屋根がない場合の、また浮屋根があつて剛体か弾性体の場合のスロッシング挙動の相違が理解できる。浮屋根がないと、すなわち液面の拘束がないと、スロッシングが大きく励起されていることがわかる。スロッシング波の上昇側が大きくなる非線形挙動を呈している。

この場合には、浮屋根を導入することにより、特異な挙動を示す。浮屋根が硬い弾性体の一部時点を除き、上昇側へのスロッシングが抑えられている。浮屋根の強度特性、変形に伴ってスロッシングに高次振動モードが卓越する。スロッシングモードには大きな変化が見られた。

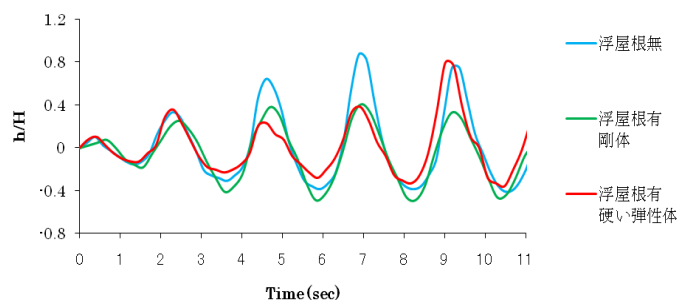


図7 スロッシング波高の時刻歴

5. あとがき

本解析により、MPS 法がタンクのスロッシングに伴う浮屋根挙動の解明に適用できることがわかった。浮屋根の構造条件はスロッシングの波高、周期、モードに大きな影響を及ぼす。流体-構造物（浮屋根とタンク側壁）の動的相互作用に伴い、流体-構造物連成解析によるスロッシングモードの変化などを基本的に分析できたことは本研究の特色である。本モデル化は必ずしも実態を反映するものではないが、スロッシング解析における MPS 法の有効性が把握でき、今後の展開が期待できる。

参考文献：1) 越塚誠一：粒子法，丸善，2005 年 2 月。