

SPH法によるスロッシング荷重の評価に関する研究

京都大学大学院工学研究科

学生員

○岩本 哲也

京都大学大学院工学研究科

正会員

小野 祐輔

京都大学大学院工学研究科

正会員

Charles Scawthorn

1. 研究の背景と目的

2003年十勝沖地震において、石油タンクのスロッシング（液面動揺）に起因した火災が発生し、社会的に大きな関心を集めた。スロッシングの研究に関しては、浮屋根式タンクの研究例が数多くある中、固定屋根式タンクの研究、特に屋根部にかかるスロッシング荷重の評価はこれまでほとんど取り扱われていない。これは、屋根の影響によって水面形状が時々刻々と変化するなど非線形性が強く、モデルに基づく解析的な取り扱いが困難であることが一因である。

そこで、本研究では大変形解析に適正の高い粒子法であるSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法による数値解析によって、液体貯蔵タンクに作用するスロッシング荷重の評価を行った。

1.0(m)の二次元密閉貯槽に水深0.5(m)貯まった流体に式(2)で表される水平加速度を与える。振幅 A は0.0093(m)、角速度 ω は5.311(rad/s)である。

$$f = A\omega^2 \sin \omega t \quad (2)$$

流体は水とするため、密度 ρ と粘性係数 μ はそれぞれ $1.0 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$, $1.0 \times 10^{-3} (\text{kg/m} \cdot \text{s}^{-1})$ とした。

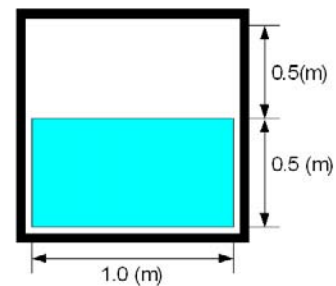


図2：貯槽モデル

2. 解析手法と解析対象モデル

SPH法では位置 x での物理量 $f(x)$ をカーネル近似と呼ばれる近似手法によって評価する。関数 $f(x)$ の近似 $\langle f(x) \rangle$ は次式によって表される。

$$\langle f(x) \rangle = \int f(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

この式によって物理量をカーネル関数 W を用いて重ね合わせ、空間的な広がりを持った領域に滑らかに分布させる。こうすることで粒子を連続体に模擬できる。

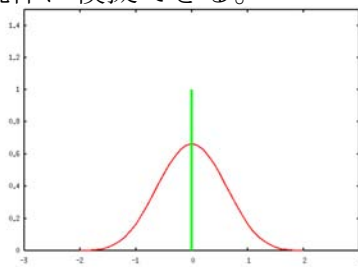


図1：平滑化のイメージ

なお、粒子間隔を0.02(m)、総粒子数を1974個、時間ステップを $1.0 \times 10^{-3} (\text{sec})$ として計算を行った。

3. 解析結果

図3は、貯槽左壁における時刻ごとの水位の変化を示している。

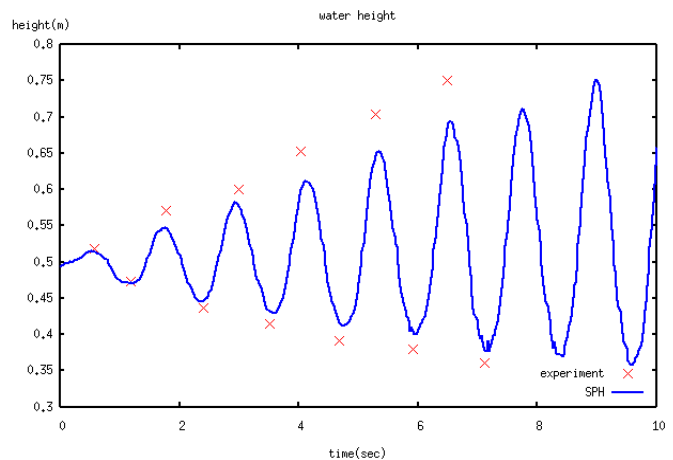


図3：水位の時刻歴

解析対象モデルとして、幅1.0(m)、高さ

キーワード スロッシング、地震、SPH

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 都市社会工学専攻 地震防災システム研究室 TEL 075-383-3252

解析結果と実験値¹⁾は概ねよく一致しており、共振によって波高が徐々に大きくなっていくのが再現できている。解析結果の波高が実験値¹⁾よりやや小さめになっているが、これは粒子法では粒子がランダムに移動しやすく、そちらにエネルギーを取られてしまう²⁾ことに加え、安定した解析を行うために導入している人工粘性の影響が考えられる。

以下の図4に各時刻ごとの解析結果の圧力分布を示す。なお、安定した圧力分布の評価を行うために、水粒子の圧力の平滑化を行って均一化を図り、時間軸に対して平滑化を行っている。

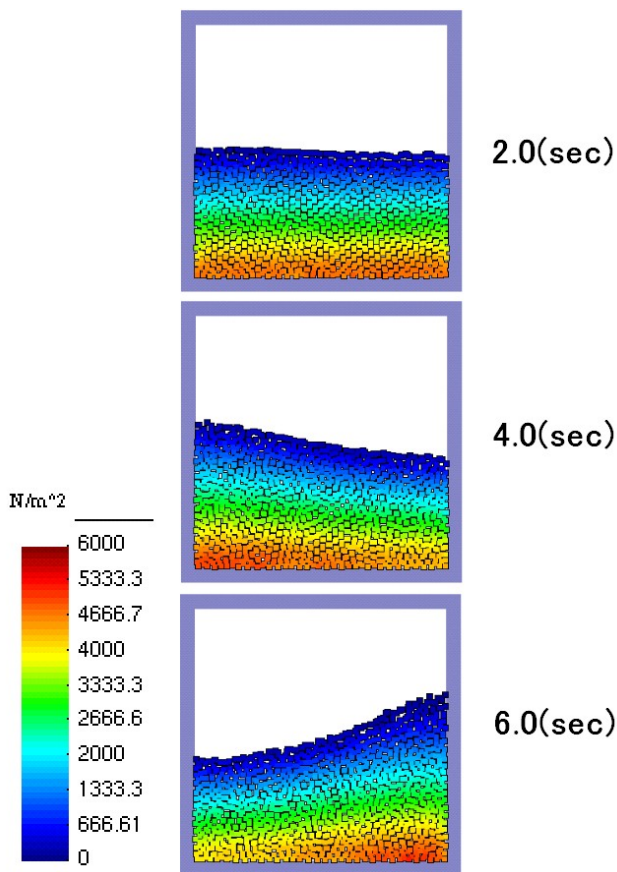


図4：圧力分布の変化

次に、図4に示したような水粒子の圧力分布から、貯槽右壁にかかる力と貯槽左壁にかかる力を算出し、右方向を正としたときの貯槽側壁にかかるスロッシング荷重を求めHousnerの式³⁾との比較を行った。以下の図5に結果を示す。

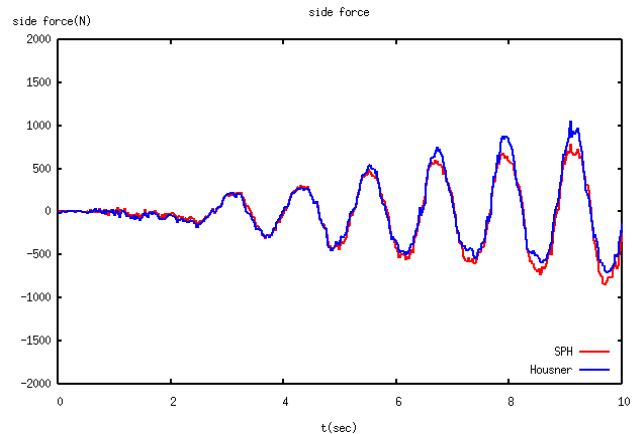


図5：貯槽にかかる力の時刻歴

SPH法による解析結果から求めた力と、Housnerの式³⁾から求めた力の時刻歴は概ねよく一致している。解析開始から時間が経過するに従って解析結果とHousnerの式³⁾による結果のズレが大きくなっているが、これはHousnerの式³⁾は水面の微小変形という仮定の下に導かれる式であり、波高が大きくなり水面形状が水平でなくなるに連れ、Housnerの式³⁾の精度が低下することが原因として挙げられる。

4. 結論および今後の研究

本ケースにおいてSPH法によるスロッシング荷重の評価の妥当性を確認できた。今後の課題として、異なる貯槽スケールでの妥当性の確認の必要がある。また、解析対象を三次元化し、一般的な三次元円筒タンクの解析に伸長させる必要がある。この他、より正確で安定した圧力評価の手法を考案する必要がある。

5. 参考文献

- 1) 田中 聖三、桜庭 雅明、檜山 和男：ALE並列有限要素法による自由表面流れの非線形解析，第14回数値流体力学シンポジウム，2000
- 2) 越塚 誠一：粒子法，日本計算工学会編，2005
- 3) G. W. Housner：DYNAMIC PRESSURES ON ACCELERATED FLUID CONTAINERS，1955