

津波と構造物の相互作用について

富塚 孝之* 湊 明彦**

Study on interaction between tsunami and structure

Takayuki Tomizuka* and Akihiko Minato*

アドバンスソフト株式会社では、津波解析として広い海域を対象とした津波伝播解析（津波解析シミュレータ T-STOC）と津波の遡上、構造物との衝突および構造物の破壊を対象とした津波遡上解析を行ってきた。津波伝播解析においては構造物の漂流、津波遡上解析においては構造物の破壊といったように、津波と構造物の相互作用を考慮している。本稿では津波による構造物の運動について、どのようなモデルが組み込まれているか紹介する。

Key word: 津波伝播解析、津波遡上解析、流体構造連成、T-STOC、自由表面、気液二相流、粒子法

1. はじめに

これまで津波解析というと、広い海域において津波の伝播速度、津波の到達場所を予測することを目的として、浅水波(長波)方程式に基づく平面 2 次元解析が多く行われてきた[1][2]。

しかし、2011 年 3 月の東日本大震災での津波被害では、建築物の破壊に留まらず、原子力発電所の機能停止による炉心溶融、放射性物質の放出などの重大な原子力事故が発生した。そのため、津波による構造物の破壊度合いや、破壊され漂流している構造物がさらなる災害を起こす可能性について、定量的に予測することがより重要な課題となった。

アドバンスソフト株式会社では津波解析業務として、広範囲な海域から津波の伝播過程をシミュレーションできる津波シミュレータ T-STOC と、遡上した津波が構造物に衝突、破壊し、構造物と波の挙動を 3 次元で詳細に解析できる流体構造連成プログラムの 2 種類のプログラムを使い分けている。

いずれのプログラムも構造物を取り扱うことが可能であるが、前者の T-STOC は漂流物の挙動を流れの情報から受動的に計算するものである。それに対して後者は、流体と構造の連成計算を行い、波の衝突、越流、構造物の破壊と漂流など津波と構造物の相互作用を 3 次的にシミュレーションするものである。

以降には各プログラムの構造物計算の取り扱いについて紹介する。

2. 津波シミュレータ T-STOC

津波シミュレータ T-STOC は、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所様で開発されたソフトウェアである。このソフトウェアは、津波による流体運動およびそれらによって生じる漂流物の挙動を計算するための数値計算モデルである[3]。

津波シミュレータ T-STOC は、太平洋など広い海域を伝播しかつ局所的に地形や構造物の影響を受けて変化する津波を高い精度で計算することができる。また、津波による漂流物の挙動を計算することにより、船舶・コンテナ等の漂流の危険性や漂流したときの挙動を推定することができる。

T-STOC は次の 3 つのモジュールから構成されている[4]。STOC-ML は沖合の津波にはよい近似

*アドバンスソフト株式会社 第 4 事業部

4th Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 顧問

Consultant, AdvanceSoft Corporation

である静水圧近似を使用しつつ、流動場の鉛直方向の変化を考慮した多層に分割可能な準3次元モデルであり、STOC-ICは津波による流体運動を計算するための、流体運動の最も基本となる方程式に基づいた3次元モデルである。STOC-DMは津波によって漂流する船舶・コンテナなどの挙動を計算するモデルで、STOC-MLおよびSTOC-ICによる津波の水位や流速の計算結果を用いて、漂流する物体を解析する。以下にSTOC-DMにおける漂流物の計算モデルについて記す。

STOC-DMでは船舶、コンテナ、自動車等が津波によって漂流し、建物等に衝突するといったような港湾での津波による漂流物の挙動を推定する。計算モデルとしては計算負荷を軽減するために、基本的に構造物の運動の影響を流体運動にフィードバックしないが、漂流物が流路を閉塞する場合には例外として漂流物を流体運動における障害物として考慮する。流体から物体に作用する力については、抗力係数および慣性力係数を用いて評価し、漂流物は剛体として変形しない前提である。漂流物は3軸方向の並進運動と3軸回りの回転運動のうち、x軸方向およびy軸方向の並進運動と鉛直軸回りの回転運動を考慮し、z軸方向の運動については運動方程式を用いず、水位変化に追従して喫水を保ちながら変化する(図1参照)。

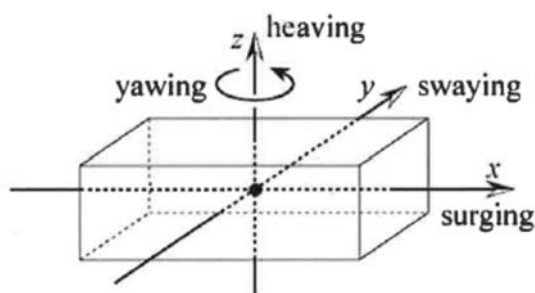


図1 漂流物の運動

STOC-DMでは漂流物の計算モデルとして以下のモデルを有している。

- ・抗力・慣性力モデル
- ・接触モデル
- ・沈降モデル

- ・閉塞モデル
- ・破壊モデル

その中でも閉塞モデルは、漂流物による流路の変化の流れにフィードバックする相互作用の効果を考慮している。流路の閉塞の判定は以下のように行う。図2に示すように漂流物モデルは簡易的に端部を半円状にした棒状の剛体としている。漂流物の重心を通り、漂流物の船首尾方向の中心線(図中の点線)とそれに直交する側舷方向の線(図中の一点鎖線)を考えた場合、漂流物が建物やフェンスと接触する点(図中の△印)の位置関係は4パターンに分けられる。これらのうちパターン2以外は重心周りに対して回転運動が生じるため流路を閉塞することにはならず、パターン2のみが閉塞物として取り扱われる。閉塞物として判定された場合、流れに対して障害物とみなされ流れを阻害する現象を再現することになる。

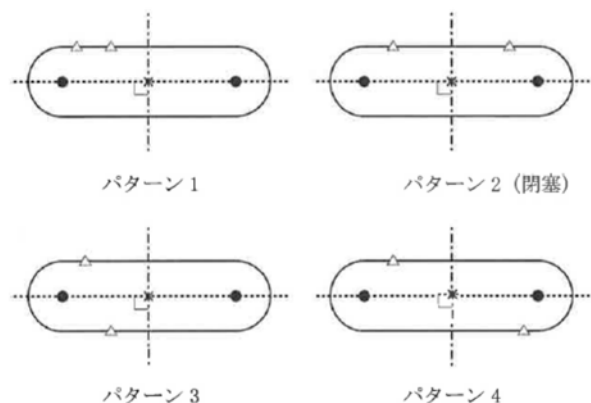


図2 閉塞判定の概略図

3. 津波遡上解析用流体構造連成プログラム

アドバンスソフト株式会社は津波遡上解析を目的とした流体構造連成プログラムを開発した。海岸線に到達した津波は防波堤の越流、建物や車両等との衝突、破壊など、気体、液体、固体が相互に作用しながら複雑な挙動をする。そこで本プログラムでは、流体計算に気液二相流モデルの中で最も実績があり汎用性に優れた二流体モデル、構造計算には構造物を固体粒子の集合体としてモデル化した粒子法を採用した。

3.1. 気液二相流—固体連成解析モデル

津波遡上解析用流体構造連成プログラムでは、構造物を固体粒子の集合としてモデル化し、二相流解析との相互作用解析が可能になる気液二相流—固体連成解析モデルを採用した[5][6]。個々の固体粒子の運動は質点に対する Newton 方程式に従うものとする。

流体計算セルの中で固体のある領域は、一旦は固体粒子間相互作用を無視して固体を液体に含めて二流体モデルの解析を行う。このときの固体と液体を合体した密度 ρ_{mix} は次のようになる。

$$\rho_{mix} \leftarrow \frac{\alpha_l \rho_l + \alpha_s \rho_s}{\alpha_l + \alpha_s} \quad (1)$$

ここで ρ_l と ρ_s は液体と固体の密度、 α_l と α_s は液体と固体の占める体積比である。従って、固体粒子が占める領域は固体と同じ密度の液体とみなし、気—液に加えて異なる密度の異種液体を加えた三相流の計算を行うことになる。

まず、仮に流体計算による速度 u_l をそのまま固体粒子の速度 v_p に設定する。

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{u}_l \quad (2)$$

ただし、流体計算の定義位置(セル中心)と固体粒子の位置は異なるため、実際には周囲の流体速度分布から内挿して固体粒子の位置 r_p の速度を求める。次に固体粒子をこの速度で移動させる。

$$\mathbf{r}_p^{(i)} \leftarrow \mathbf{r}_p^{(i)} + \mathbf{v}_p^{(i)} \Delta t \quad (3)$$

この結果、固体の各部分は流体速度場と同じ変形をするため、固体粒子群の配置は固体の形状が歪んだ形になり、隣接粒子間距離が平衡距離からずれることになる。そこで固体粒子間相互作用を考慮し、式(2)式による固体粒子の速度を与えることにより変形した固体をもとの形状にもどす効果がある。この結果、固体粒子と液体が共存する計算セルにおいて固体粒子の運動と流体の運動が異なるため、下記の固体粒子—液体間抗力を流体計算の外力 f_l として与える。

$$\mathbf{f}_l^{(i)} = -c\rho_l |\mathbf{v}_p^{(i)} - \mathbf{u}_l| \quad (4)$$

ここで c は抗力係数である。

上記した気液二相流—固体連成解析の一連の計算手順を図3に示す。

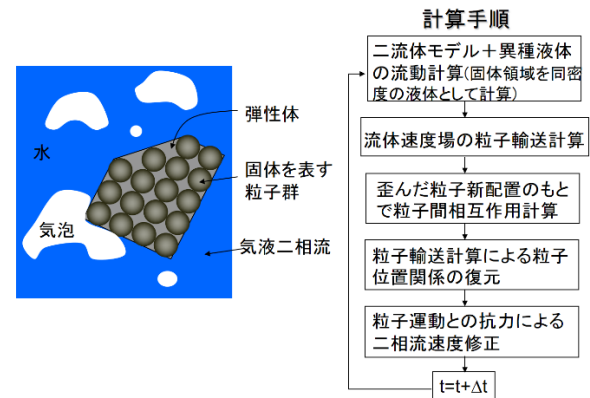


図3 気液二相流—固体連成解析モデル

粒子が固定した壁に衝突したときは、図4のように壁の中に仮想的な固体粒子が埋め込まれていると考える。この粒子間の相互作用により、固体粒子は壁面で反発する計算になる。一般の粒子法計算で計算時間が大きいのは粒子間距離を計算して相互作用する粒子を選別する過程であるが、ここまでの計算では個々の固体粒子について隣接粒子は決まっており、壁との衝突については壁との距離が分かれば計算できる。固体の破壊を考えると、図5のように破壊前に遠方にあった固体粒子同士が衝突することがある。このときは固体粒子間距離を計算して、衝突を判断しなければならない。計算時間が増大するが、衝突する粒子は固体表層の粒子同士であるため、固体表層の粒子のみ選択して計算するなど工夫した。

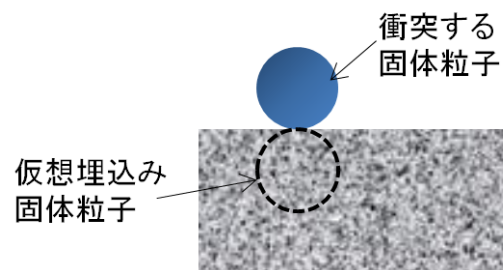


図4 固体粒子と固定した壁の衝突のモデル

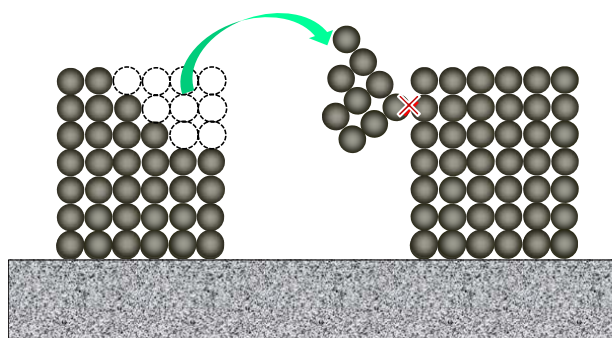


図 5 固体の破壊と衝突

3.2. 波力評価

気液二相流－固体連成解析モデルの検証計算の一環で、複数構造物に作用する津波波力の評価を行った。

文献[7]では護岸背後に設置した複数の構造物群に作用する津波力を水理実験により評価している。水理実験では波の進行方向に矩形の構造物を4列（合計12個）設置し、各列の構造物が受けた波力の比を評価している。同様の解析モデルを作成し、気液二相流－固体連成解析モデルで比較計算を行った結果を以下に示す。

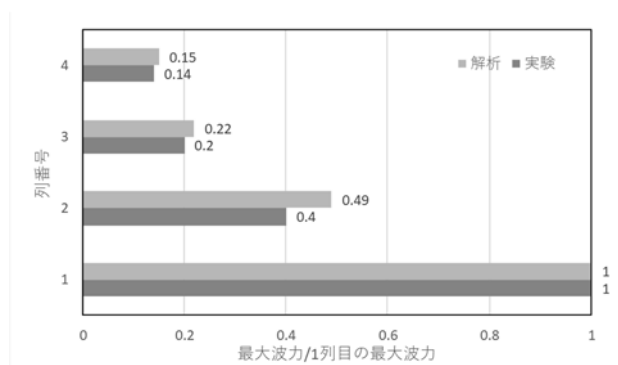


図 7 構造物の最大波力検証計算結果

図7は比較計算結果として、構造物が受けた最大波力を各列の比で整理した。水理実験と比較して、ほぼ同様の波力が得られていることを確認した。

4. まとめ

津波解析において津波と構造物の相互作用は物理的に複雑な現象であり、予測する目的が漂流物の挙動なのか、建築物の被害度なのかにより適応する計算モデルも異なる。本稿では津波と構造

物の相互作用に係る計算モデルについて、津波シミュレータ T-STOC とアドバンスソフト株式会で開発した津波遡上解析を目的とした流体構造連成プログラムの計算手法について紹介した。気液二相流－固体連成解析モデルでは固体粒子間相互作用の精度においてまだ検討の余地はある。しかし、計算格子の制約条件にとらわれず、さまざまな建築物、構造物に適応可能である計算モデルとして有望である。

参考文献

- [1] 津久井啓介, 藤沢康雄, 津波の数値シミュレーション, 大林組技術研究所報, No.57, pp.121-124, (1998)
- [2] 高橋智幸, 津波防災における数値計算の利用, 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌, 12(2), pp.23-32, (2004)
- [3] 富田孝史・本多和彦・千田優 "高潮津波シミュレータ (STOC) による津波被害解析手法", 港湾空港技術研究所報告 第55巻第2号
- [4] T-STOC ユーザーマニュアル
- [5] Minato, A., Takamori, K., Ishida, N., Numerical Method for Interaction between Gas-Liquid Two-Phase Flow and Solid Motion, Proc. Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, Italy, pp.1537-1543, (1999)
- [6] 湊明彦, 拡張二流体モデルと粒子法を用いた気液二相流と固体運動の連成解析, 日本混相流学会 2006 年度年会講演論文集, (2006)
- [7] 池末俊一、四條利久磨、佐藤敏浩、複数構造物に作用する津波波力に関する3次元数値シミュレーション、土木学会第7回次学術講演会（平成24年9月）

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。（ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。）