

# 粒子法による流体剛体連成解析の定式化の差異による精度確認

## Verification of different formulations for the fluid rigid body interaction simulation by a particle simulation

大屋 朋子・九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻

Tomoko OYA, Kyushu Univ.

浅井 光輝・九州大学大学院准教授  
工学研究院社会基盤部門

Mitsuteru ASAI, Kyushu Univ.

伊津野 和行・立命館大学教授  
理工学部都市システム工学科

Kazuyuki IZUNO, Ritsumeikan Univ.

磯部 大吾郎・筑波大学教授  
システム情報系構造エネルギー工学科

Daigoro ISOBE, Tsukuba Univ.

Key Words: SPH, particle method, Tsunami, fluid-rigid interaction

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって東北地方の太平洋沿岸部は甚大な被害を受けた。中でも橋梁に関しては、上部構造の流失被害が各地で発生し、震災後の支援・復旧活動に大きな支障をきたした。現在、今後危惧される巨大地震に伴う津波に備えて橋梁の津波対策が積極的に議論されており、実寸大での橋梁流失実験が現実的に困難であるため数値シミュレーションは橋梁の津波対策の検討に有効な手段となりえる。本研究では、数値解析手法の粒子法の一つであるSPH法を用い、橋梁上部構造を流失させ、流失の挙動を確認する。粒子法による流体剛体連成解析には、剛体境界面に作用する力を駆動力とする外力ベースの定式化と、剛体を一旦流体として解き速度に拘束を付与する速度ベースの定式化がある。本論文は、解析結果と津波時の橋梁の上部構造流失を模擬した水理実験を比較することで、各定式化の精度を検証した。

### 1. はじめに

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波により、2万人近い死者・行方不明者が出ただけではなく、多くの社会インフラ構造物も津波により被害を受けた。インフラ構造物の中でも橋梁に関しては、宮城県仙台市から太平洋沿岸を上る国道45号に沿って、上部構造の流失が多数見られた。この流失被害により、被災地への救援活動の遅れや、被災地の復旧・復興にも遅れが生じた。この被害を受け、橋梁構造物の重要性が再確認され、早急な橋梁への津波対策が必要となってくる。そこで、本研究では数値シミュレーションを用い、津波が橋梁に作用する流体力や橋梁上部構造の流出の挙動を解析的に検討した。橋梁に作用する津波流体力評価に向けた小型模型実験<sup>1)</sup>の結果と解析結果の比較から、流体力を精度よく再現できることは確認されている。流体剛体連成解析において定式化はすでにされているものの、解析精度の検証は不明瞭であったため、本研究では模型実験の結果と解析結果から流体剛体連成解析の妥当性を確認した。また、解析手法は自由表面形状変化などの大変形解析に適している粒子法の一つであるSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法を採用した。

### 2. 解析手法と精度確認

#### 2-1 SPH法の基礎式

SPH法は、圧縮性流体の解析手法として提案されたのちに、非圧縮性流体解析法(ISPH法)へと拡張された。図-1のように連続体を有限個の粒子に離散化し、対象とする粒子の影響半径内に存在する近傍粒子に重み関数をかけて、一種の重み付き平均として近似する手法である。粒子 $j$ の質量 $m^j$ 、密度 $\rho^j$ とし、重み関数を $W$ 、影響半径を $h$ とすると、物理量 $f(x)$ は以下の式で表される。

$$f(x) = \sum_{j=1}^N \frac{m^j}{\rho^j} f(x) W(x-x^j, h)$$

流体運動の支配方程式として、ナビエ・ストークス方程式を解く。本解析では、SPH法の中でも圧力を陰的に、速度を陽的に解き、非圧縮性流体に適した解法とされる安定化ISPH法<sup>2)</sup>を採用した。

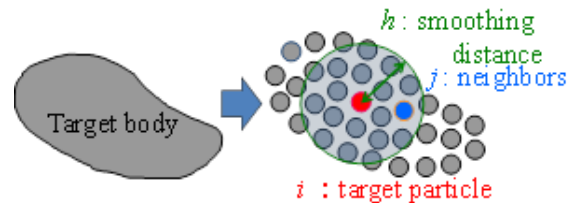


図-1 SPH法の基本概念

#### 2-2 流体剛体連成解析の2つの定式化

流体剛体連成解析には速度ベースと外力ベースの2つの定式化がある。本研究では越塚<sup>3)</sup>が提案したMPS法による擬似的剛体モデルをISPH法へ適用した流体-剛体の連成解析手法を速度ベース、境界面での力の伝達として基本物理に従って、流体と剛体連成する定式化解析手法を外力ベースとしている。

流体剛体連成解析を解く上での、計算のアルゴリズムを簡略したものを図-2に示す。速度ベースの定式化は、一旦は剛体の密度を持つ流体として解析し、剛体運動を満足させるために強制的な拘束を与えることで剛体粒子の速度や位置を更新していく。外力ベースの定式化は、流体はナビエ・ストークス方程式、剛体は並進方向と回転方向の運動方程式を解き、剛体粒子の速度や位置を更新していく。その後両者を、境界条件を通して連成する。本研究では、外力ベースの定式化の精度確認を行うこととする。

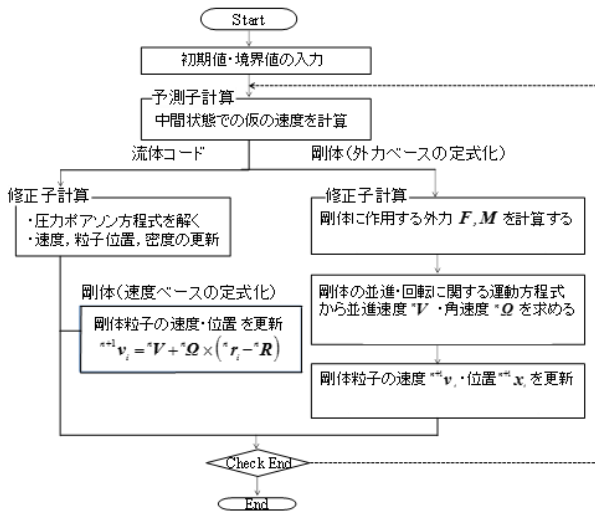


図-2 計算のアルゴリズム

### 2-3 橋梁上部構造流出を模擬した水理実験

津波発生時の橋梁の上部構造流出を模擬した水理実験を行った。その際の、実験の概要を図-3に示す。この実験では貯水部に溜めた水を、ゲートを勢よく引き上げることによって放流させ、上部構造を模擬した模型に衝突させた。ここで、模型の断面図及び寸法を図-4に示す。模型が流失する際の運動を追跡するために、この実験では3D モーションキャプチャー用の自発光マーカーを模型上部に設置し、模型が流失する際の回転角度（奥行き方向）を記録した（図-5）。なお、初期の貯水高さは250mm, 300mm, 350mmの3ケースを行っているが、解析では350mmのケースについて実験結果と比較を行った。また、実験では橋脚の幅は5mmを使用しているが、解析においては粒子径との兼ね合いから幅を10mmに設定した。

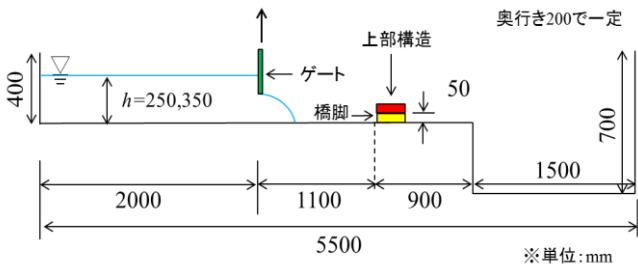


図-3 実験の概要

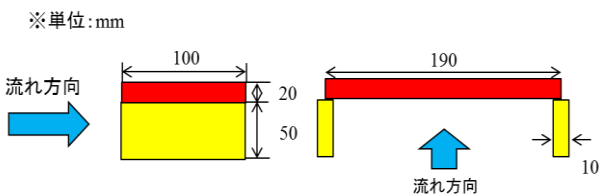


図-4 模型の断面図

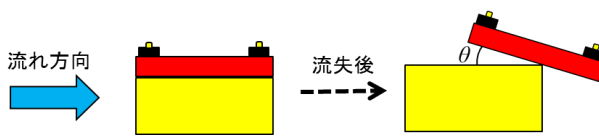


図-5 回転角度

### 2-4 数値解析と水理実験の結果の比較

数値解析においては、3次元でモデルを作成した。表-1に

示すように、解析条件は粒子径を0.25cmに設定したことで、総粒子数は約1400万となった。また、時間増分は0.0005secで実時間は1.6秒程度である。壁面への速度の境界条件は、すべり条件の割合を80%に低減させ解析を行った。なお、橋脚は完全に固定し、上部構造と橋脚の間の摩擦は無視した。

図-6に貯水高さ350mmの場合の、数値解析と水理実験の回転角度の結果を示す。この実験は計4回ずつ行われ、その内橋脚のはがれや、ゲートの開きが不完全であったものを除いた3回のデータをプロットしている。各実験結果にばらつきがあるため、3回の実験結果と数値解析による計算結果を比較した。実験結果と同様に、数値解析の結果も津波が衝突した後、回転角度が正から負へと移行する傾向（図-7）が見られた。以上の結果から、流体剛体連成解析において外力ベースの定式化を用いることで剛体運動の精度に関して一定の妥当性を確認することができた。なお、今回は橋脚と上部構造との摩擦は考えていないため、上部構造に作用する水平抵抗力を考慮することで、より精度の良い解析結果が得られると考えている。

表-1 解析条件

粒子間隔	総粒子数	時間増分	実時間
0.25cm	1400万	0.0005sec	1.6秒

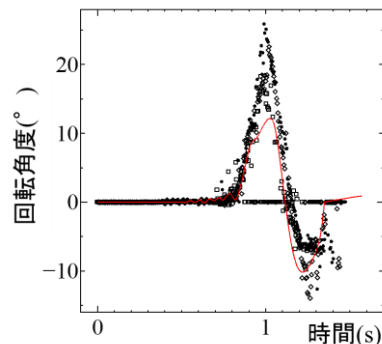


図-6 貯水高さ350mmの場合の回転角度

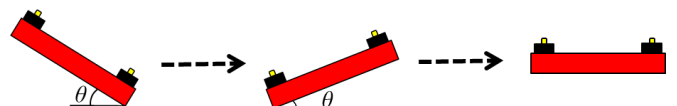


図-7 流失の傾向

### 3. まとめ

流体剛体連成解析の定式化の一つである、外力ベースを用いた数値解析を行うことで剛体運動の精度に関する妥当性を確認することができた。今回の研究においては上部構造を長方形と見なし、水理実験や数値解析を行ってきた。今後の課題としては、実際に東北地方太平洋沖地震で被災した橋桁を再現した上部構造流出の数値シミュレーションを行い、また橋桁の高さの違いが流失の挙動にどのような影響を与えるのか検討していく必要がある。

### 参考文献

- 1) 田邊将一, 浅井光輝, 中尾尚史, 伊津野和行: 3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.293-302, 2014.
- 2) M. Asai, A.M. Aly, Y. Sonoda and Y. Sakai, A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, Int. J. for Applied Mathematics, Vol.2012(2012), Article ID 139583
- 3) 越塚誠一: 「粒子法」, 丸善(2005)