

# SPH 法を用いた流体剛体連成手法による橋梁流失の再現解析

九州大学大学院 学生会員 ○ 宮川 欣也  
 九州大学大学院 正会員 浅井 光輝  
 九州大学大学院 学生会員 田邊 将一

## 1. はじめに,

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は、沿岸地域の多くの土木構造物に甚大な被害をもたらした。特に橋梁における上部構造の流失は交通システムの混乱を引き起こし、震災後の復興活動に大きな支障をきたした。そこで今後危惧されている巨大地震に伴う津波に対して、橋梁の防災・減災技術の再検討を行うことが求められており、津波被害を事前に精緻に想定することが必要である。しかし津波被害は、地震の規模や震源地、津波高さなどの要因により大きく変化し、また実験による実大スケールの被害予測は、スケール効果の問題やコスト的にも難しい。このため検証と妥当性の確認 (V&V) が行われた数値解析手法により、実大スケールで被害を予測し、さまざまな条件化での解析より得られた結果を用いて津波対策を行うことは有効な手段であるといえる。

そこで本研究では、東日本大震災により橋梁の流失が報告された、宮城県南三陸町の歌津大橋を解析の対象とし、流失被害を再現することで、実大スケールにおける解析手法の妥当性確認を実施することにした。さらに、同地区での津波遡上解析を行い、流体剛体連成解析を行う際の流入条件への適用方法を考察した。

## 2. 解析手法の概要

SPH 法は、解析対象の連続体を有限個の粒子に離散化し、対象とする粒子の物理量を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。SPH 法の基礎式を次式で示す。ここで、下付き添え字  $i, j$  は粒子番号を示し、 $\mathbf{x}$  は粒子位置ベクトル、 $m$  は粒子が代表する領域の質量、 $\rho$  は物体の密度、 $W$  は重み関数、 $r_{ij}$  は対象とする粒子と近傍粒子の距離、 $h$  は影響半径を示す。

$$\phi(\mathbf{x}_i, t) \approx \langle \phi_i \rangle = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} W(r_{ij}, h) \phi_j(\mathbf{x}_j, t) \quad (1)$$

また、 $\langle \rangle$  で囲まれた関数は SPH 法による近似値を表し

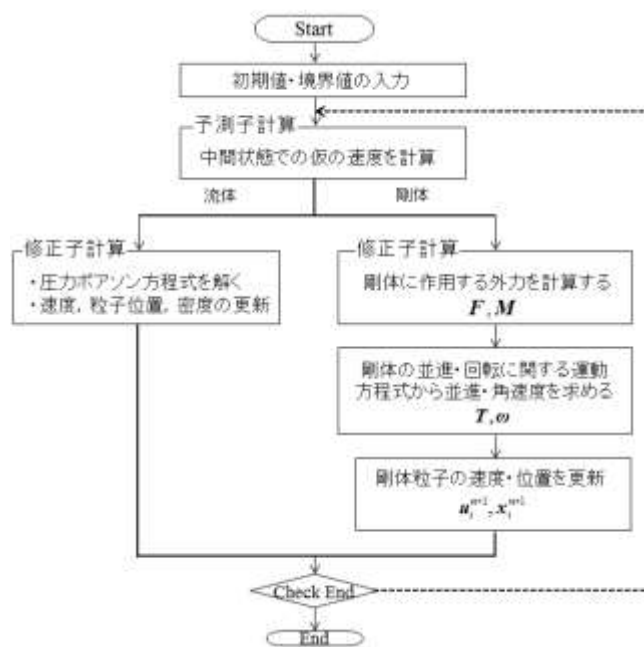


図-1 流体剛体連成アルゴリズム

ている。本研究では特に、非圧縮性流体解析用に開発された ISPH 法の改良案である安定化 ISPH 法<sup>1)</sup>を採用した。なお、安定化 ISPH 法の詳細な手順については文献を参照されたい<sup>1)</sup>。

ここでは ISPH 法の解析手順に加え、剛体全体の挙動を表現する式を組み込むことで、流体-剛体連成解析を試みた(図-1)。以下に手法を簡単に説明する。

まず、解析モデル作成時に剛体も流体粒子と同様に粒子へ離散化する。次に、剛体に作用する力として、重力  $\mathbf{g}$ 、剛体表面に作用する流体力  $\mathbf{F}_f$ 、剛体と固定境界に作用する接触力  $\mathbf{F}_e$  のみが作用すると仮定し外力を算出する。ここで、剛体と固定境界に作用する接触力は、ヘルツの弾性体接触理論を用いてモデル化した。また、剛体表面に作用する外力より、流体力によるモーメント  $\mathbf{M}_f$ 、接触力によるモーメント  $\mathbf{M}_e$  を算出する。その後、以下の 2 式より剛体の並進速度  $\mathbf{T}$ 、回転速度  $\boldsymbol{\omega}$  を導出する。

$$\mathbf{T}^{n+1} = \mathbf{T}^n + \Delta t \left( \mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}_f}{M} + \frac{\mathbf{F}_e}{M} \right) \quad (2)$$

$$\omega^{n+1} = \omega^n + \Delta t(M_f + M_c) \quad (3)$$

ここで、上付きの添字は時間ステップであり、両式より求められた並進速度と、角速度ベクトルから、剛体粒子の速度として更新し、この速度に応じて剛体粒子の位置を更新する。

$$u_i^{n+1} = T_c^{n+1} + \omega_c^{n+1} \times (r_i - r_c) \quad (4)$$

なお、水粒子に関しては上記の補正は行わず、修正子計算により求めた値を用いて状態の更新を行う。

### 3. 解析例

前節までに説明した手法を用い、簡単な例題を用いて手法の妥当性を確認する。解析モデルの概要を示す(図-2)。ここでは、橋桁の形状の違いによる流失挙動の変化を見るため、桁高の違う2つのモデルを採用した(図-3)。橋脚は完全に固定し、橋桁の密度は鉄筋コンクリートの平均重量である  $2450\text{kg/m}^3$  とした。ここで流入条件としては、津波高8mの波に  $10\text{m/sec}$  の初速を与え、貯水部の先端位置(40.0m)を通過する水に継続的に  $10\text{m/sec}$  を与える条件としている。解析条件の詳細は表-1に示す。

表-1 解析条件

粒子間隔	総粒子数	時間増分	実時間	解析時間 (256core)
0.2cm	約106万	0.001sec	10.0sec	10時間

### 4. 解析結果

解析結果を図-4に示す。この結果から、桁高の低いものと比べ、桁高の高い橋桁モデルではより回転を伴う流失が見られた。このような現象は、歌津大橋の実際の被害と類似した傾向を示しており、定性的ではあるが橋桁の断面形状の違いによる流失挙動の変化をある程度は表現できたといえる。

### 5. おわりに

本報で紹介した流体剛体連成解析を用いて、橋梁流失シミュレーションを実施し、定性的には流失挙動の再現が可能であることを示した。また現在、歌津地区において津波遡上解析を行っており(図-5)、津波遡上解析との連成により流入条件を見直すことで、今後、より現実的な条件を用いた橋梁流失シミュレーションへと発展させる予定である。

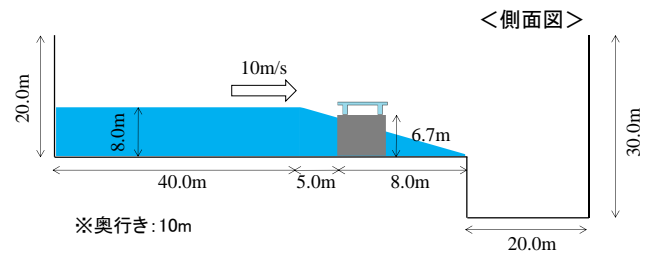


図-2 解析モデル

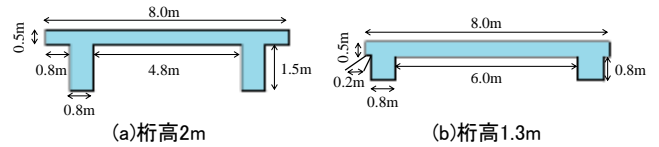
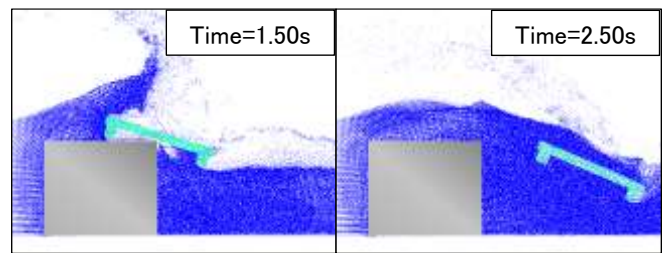
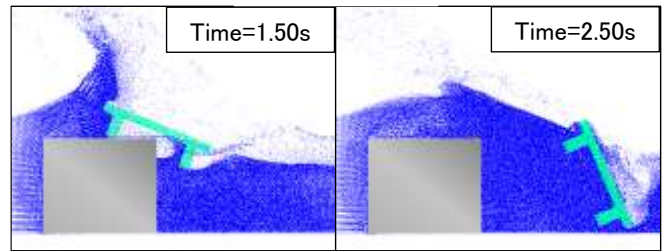


図-3 橋桁モデル断面図



a) 桁高 1.3 m



b) 桁高 2.0 m

図-4 解析結果例

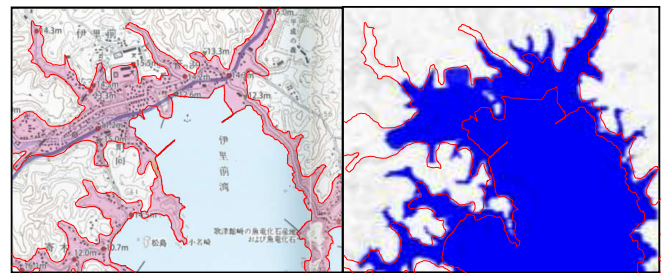


図-5 震災被害報告<sup>2)</sup>と解析結果の比較

### 6. 参考文献

- 1) Mitsuteru Asai, Abdelraheem M. Aly, Yoshimi Sonoda and Yuzuru Sakai, A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, International Journal for Applied Mathematics, Volume 2012 (2012), Article ID 139583, 24 pages
- 2) 原口強、岩松暉：改定保存版東日本大震災津波詳細地図、2013,10