

### 3 次元粒子法による歌津大橋の橋梁流失の再現解析とそのメカニズムの解明

九州大学 学生会員 ○宮川 欣也  
 九州大学 正会員 浅井 光輝  
 九州大学 正会員 園田 佳巨

#### 1. はじめに

2011年3月11日に起きた東北地方太平洋沖地震による津波被害により、沿岸地域の多くの土木構造物に甚大な被害をもたらされた。特に橋梁における上部工の流失は、交通システムの混乱を引き起こし、災害復旧活動に大きな支障をきたした。さらに、今後危惧される巨大地震に伴う津波に対して、沿岸地域の橋梁における防災・減災技術の再検討が早急に求められており、津波被害を正確に予測することが求められている。このような背景から、本研究では津波による上部工の流失被害を解析より予測することを目的としている。そこでまず、東日本大震災で実際に上部工の流失が報告された、宮城県南三陸町の歌津大橋を解析対象とし、歌津大橋における上部工の流失を再現することを試みた。解析手法は、流体分野だけでなく固体分野の大変形解析にも適用されている粒子法の一つである SPH 法を採用した。本報では、SPH 法を用いた流体-剛体連成解析のアルゴリズムを提案し、歌津大橋における上部工の流失の再現解析を行い、そのメカニズムについて考察した。

#### 2. 解析手法の概要

SPH 法は、物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 法では、対象粒子  $i$  の物理量を近傍粒子  $j$  の物理量に重み関数を乗じて次式で表わす。ここで、 $W$  は重み関数を表している。

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

本研究では特に、非圧縮性流体解析用に開発された Incompressible SPH 法(以下 ISPH 法と略記)の改良版である安定化 ISPH 法を採用した。なお、安定化 ISPH 法の詳細な手順については文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

本研究では、図-1 に示した安定化 ISPH 法のアルゴリズムに剛体の動き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。なお、同図に赤字で示した修正がなければ、通常安定化 ISPH 法と全く同じ計算手順となる。以下にその修正箇所の詳細を説明する。

まずは、剛体粒子も水とは異なる密度をもつ流体粒子として、通常非圧縮性流体用 SPH 法の解析手順により、流速と圧力を算出する(図-1 の修正子計算までの手順)。その後、各剛体に対して、次式により並進速度  $T$  と角速度ベクトル  $\omega$  を求める。

$$T = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n v_k \tag{2} \quad \omega = \frac{1}{I} \sum_{k=1}^n r_k \times (m_k v_k) \tag{3}$$

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。

$$v_k^{t+1} = T + \omega \times r_k \tag{4}$$

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圧力と流速を用いた状態の更新を行う。

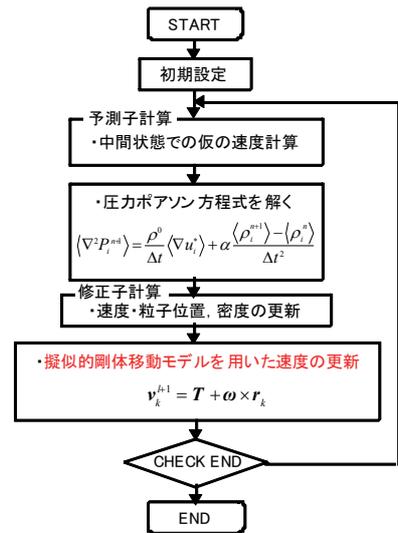


図-1 剛体運動アルゴリズム

キーワード 津波 粒子法 歌津大橋

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 ウエスト 2 号館 1102 号室 構造解析学研究室 TEL 092-802-3370

### 3. 解析例

剛体流失シミュレーションを実施する前に、上部工を固定した場合の橋梁周辺の流れを確認するため、実寸大の3次元解析モデル(図-2)を作成し、解析を行った。上部工モデルには、歌津大橋の第8径間の断面形状を採用した(図-3)。ここで、流入条件としては10m/secの初速を水に与え、貯水部の先端位置(50m)を通過する水に継続的に10m/secを与える条件としている。後方には橋梁模型を通過した波が反射して戻らないようにタンクを設けた。解析条件の詳細は表-1に示す。

表-1

粒子間隔	総粒子数	時間増分	実時間	解析時間(64node)
6cm	約5500万粒子	0.001sec	2.55sec	約47時間

図-4に解析から得られた $T=1.9\text{sec}$ 時の橋梁まわりの流れを示し、上部工モデルに作用する水平方向、鉛直方向の津波流体力を図-5に示す。この結果から橋梁まわりの流れを定性的に表現できており、圧力コンターからも津波が衝突した部分の圧力値が高くなっていることがわかる。なお、今回の解析では実験との比較が困難であるため定性的な評価にとどまっているが、前報<sup>2)</sup>において小型実験との比較検証により手法の妥当性は検証している。

次に、先に述べた剛体移動の計算式を導入した上部工流失シミュレーションの解析を行った。解析モデルは、図-2と同じ3次元解析モデルを用い、上部工の密度としては鉄筋コンクリートの代表的な値である $2450\text{kg/m}^3$ を与えた。解析条件の詳細を表-2に示す。

表-2

粒子間隔	総粒子数	時間増分	実時間	解析時間(32node)
6cm	約5500万粒子	0.001sec	3.75sec	約109時間

図-6に $T=3.7\text{sec}$ 時の解析結果を示す。同図より、津波によって流失する上部工の挙動が適切に表現できていることを確認できた。ただし、橋桁が示した剛体移動は、ほぼ並進運動のみを示しており、東日本大震災上部工流失の際に確認された回転運動は見られなかった。今後は、流体力を考慮した、流体-剛体連成アルゴリズムの構築が必要であると考えている。

### 5. おわりに

本報で紹介した流体-剛体連成アルゴリズムを用いて、歌津大橋を模した実寸大解析モデルにおける上部工流失シミュレーションを実施し、定性的に流失過程を表現することができた。今後は支承あるいはアンカー等による抵抗機能を考慮することで、より現実的な歌津大橋の上部工の流失シミュレーションへと発展させる予定である。

### 謝辞

本研究の一部は、日本橋梁建設協会より研究助成を受けました。

### 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) 浅井光輝, 田邊将一, 森本敏弘: 想定外な巨大津波被害を事前予測するための試み, 橋梁と基礎第47巻8月号 pp.74-76

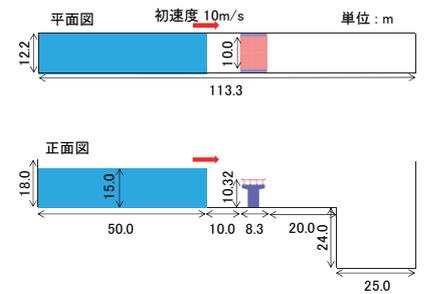


図-2 解析モデル

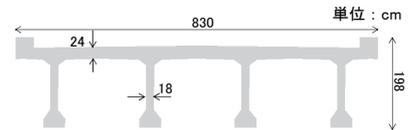


図-3 上部工モデル断面図

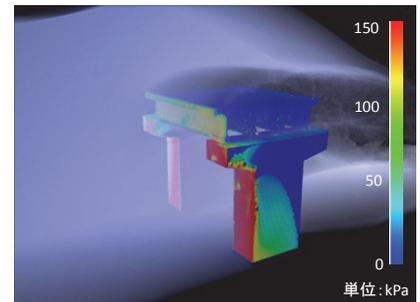


図-4 解析結果例

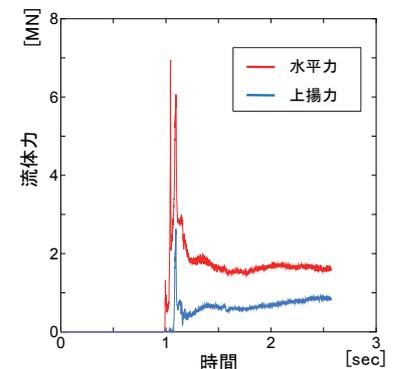


図-5 津波流体力



図-6 上部工流失