

粒子法による橋桁流出被害予測シミュレーションに向けた基礎検討

九州大学	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	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での津波被害により、国内における多くの土木構造物に甚大な被害がもたらされた。特に、橋桁の流出被害は交通システムの機能障害を引き起こし、災害後の復旧活動に大きく支障をきたした。また、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、津波被害を事前に精緻に想定することが求められている。そこで本研究では、津波が橋梁に衝突した後の橋桁の挙動を正確に把握することを目的とした。解析手法としては、流体だけでなく、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。本報告では、SPH 法を用いた流体-剛体の連成解析のアルゴリズムについて述べ、剛体の流出シミュレーションを試みた事例を紹介する。

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(図-1)。以下に本解析の計算手順を示す。

SPH 法では、対象粒子の物理量 $f(x)$ を、近傍粒子の物理量を用いて次式で表わす。ここで、 W は重み関数を示している。

$$f(x^i) \approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x^j) W(x^i - x^j, h) \quad (1)$$

以降、下付き添え字 i, j, k は粒子番号を示し、 ρ_j, m_j はそれぞれ粒子 j が代表する近傍粒子の密度と質量とする。また、 $\langle \rangle$ で囲まれた関数は SPH 法による近似値を表している。

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¹⁾を採用した。以下に射影法を用いた安定化 ISPH 法の計算手順を簡単に示す。詳細な手順については文献を参照されたい¹⁾。

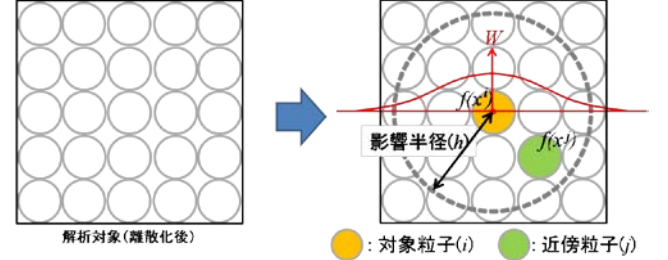


図-1 SPH 法の基礎概念図

まず、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式の圧力勾配項を除いた式から仮の速度を導出する。

$$\mathbf{v}_i^* = \mathbf{v}_i + \Delta t (\nu \langle \nabla^2 \mathbf{v}_i^* \rangle + \mathbf{b}_i) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{v}^*$ は中間状態での仮の速度、 Δt は時間増分、 ν は動粘性係数、 $\mathbf{b}$ は物体力を表す。

次に、質量保存則より導かれる圧力ポアソン方程式を用いて次の時間ステップの圧力を導出する。

$$\langle \nabla^2 p_i^{l+1} \rangle = \frac{\rho_i^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{v}_i^* \rangle + \alpha \frac{\rho_i^0 - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t} \quad (3)$$

ここで、 α は 0~1 までの値をとる緩和パラメータ、 ρ^0 は初期密度を示す。

最後に、次の時間ステップの圧力と、仮の速度を用いて次の時間ステップにおける速度を求める。

$$\mathbf{v}_i^{l+1} = \mathbf{v}_i^* - \Delta t \left(\frac{1}{\rho^0} \langle \nabla p_i^{l+1} \rangle \right) \quad (4)$$

本研究ではこの ISPH 法の解析手順に加え、剛体全体の挙動を表現するために、剛体内の粒子の物理量を用いて次式より、並進速度 $\mathbf{T}$ 、角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ を求める。

$$\mathbf{T} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mathbf{v}_k \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{I} \sum_{k=1}^n \mathbf{r}_k \times (m_k \mathbf{v}_k) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{r}_k$ は剛体中心からの距離を示す。上記の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内の粒子の速度として更新する。(図-2)

$$\mathbf{v}_k^{l+1} = \mathbf{T} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_k \quad (7)$$

3. 解析例

今回はまず、橋桁を固定した場合の橋梁まわりの流れを確認するため、図-3 に示す実寸大の 3 次元解析モデルを作成し、解析を行った。橋桁モデルの断面図は図-4 に示し、解析モデル全体の奥行きは 12.2m となっている。

ここで、流入条件として 10m/s 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/s を与える条件としている。後方には橋梁モデルを通過した波が反射して戻ってこ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。

解析結果を図-5 に示す。この結果から橋梁周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分かる。なお、今回の解析では実験等との比較ができないため定性的な評価にとどまっているが、前報において小型実験との比較検証を通して精度を確保した手法を用いている。

5. おわりに

最後に、先に述べた剛体移動の計算式を導入し、簡潔なモデルを用いて、剛体移動シミュレーションを行った例を図-6 に示す。このシミュレーションから、流体により押し流される剛体の挙動が定性的に表現できていることを確認している。今回の報告では、橋桁を固定した橋梁モデルに流れる流体の動きを再現するところまでにとどまっているが、今後、先の剛体の移動の式を組み込むことでまずは橋桁流失の挙動を再現することが可能であると考えている。最終的には、支承部における流体抵抗力も加味し、より現実的な橋桁の流出シミュレーションへと発展させる予定である。

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) AM.Aly, M.Asai, Y.Sonoda, Simulation of free falling rigid body into water by a stabilized incompressible SPH method, Ocean Systems Engineering, Vol.1, No.3(2011) 207-222

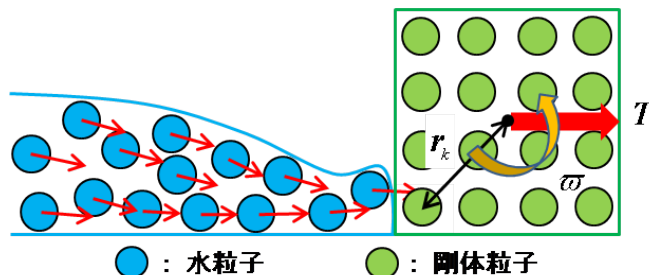


図-2 剛体流出の概念図

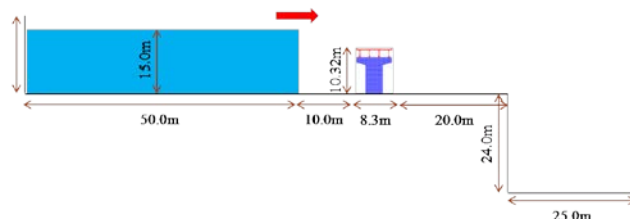


図-3 解析モデル

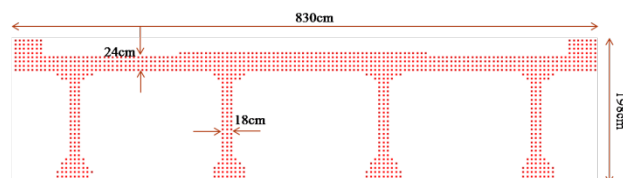


図-4 橋桁モデル断面図

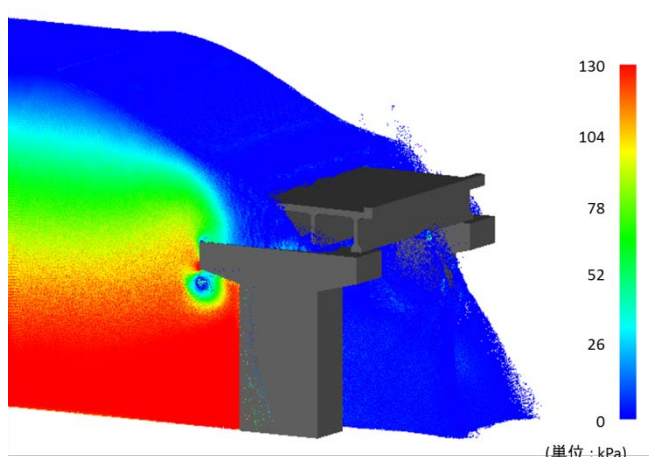


図-5 解析結果例

表-1 解析条件 (九州大学のスパコンを使用)

粒子間隔	総粒子数	時間増分	実時間	解析時間
6cm	5500 万	0.001sec	2.5sec	約 47 h



図-6 剛体移動シミュレーション