

粒子法による橋桁に作用する津波流体力評価とその精度検証

九州大学大学院 学生会員 ○ 田邊 将一
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による津波被害で、多くの橋桁の流失が見られ、橋梁を含む我が国のインフラ施設は甚大な被害を受けた。東日本大震災の発生から数年が経過した今、南海トラフ地震をはじめとする今後危惧される巨大地震に対して、橋梁の津波対策が積極的に進められている。なかでも橋梁の流出対策検討においては作用する流体力の定量的な評価手法が求められている。そこで本研究では、まずは橋桁に作用する流体力評価に焦点をあて、小型模型実験による実験結果と数値解析結果との比較検証を実施した。また、粒子法の解析精度向上を目的として、これまでの既往研究により問題であった境界処理について改良した。

2. 解析手法の概要

本研究では、非圧縮性流体解析用に開発された Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics(以降、ISPH 法と略記)を用いた。ISPH 法の中でも圧力精度向上のために修正した非圧縮条件緩和型 ISPH 法¹⁾を使用し、さらに境界条件処理法としては仮想マーカーを用いた処理法を利用する。解析手法の詳細は文献²⁾に委ね、ここでは、速度の境界条件としてすべり～非すべり条件の中間状態を付与するための方法を簡単に提示する。

まずは図-1を参照して壁粒子と対をなす仮想マーカー(x_v)において、SPH 法の内挿近似の手順により、次式により流速 v_v が評価されたものとする。

$$v_v(x_v, t) \approx \langle \phi_i \rangle = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \tilde{W}(r_{ij}, h) v_j(x_j, t) \quad (1)$$

すべり条件を満足させるには、壁粒子は仮想マーカー上での流速 v_v と鏡映対称な流速となればよい。このミラーリング操作($v_v \rightarrow v'_w$)は次式により与えられる。

$$v'_w = M v_v \quad (2)$$

ここで M はミラーリング操作を与えるための2階のテンソルであり、壁の内向き法線ベクトル $n = (n_1, n_2, n_3)^T$ とクロネッカー δ を用いて次のように与えられる。

$$M_{ij} = \delta_{ij} - 2n_i n_j \quad (3)$$

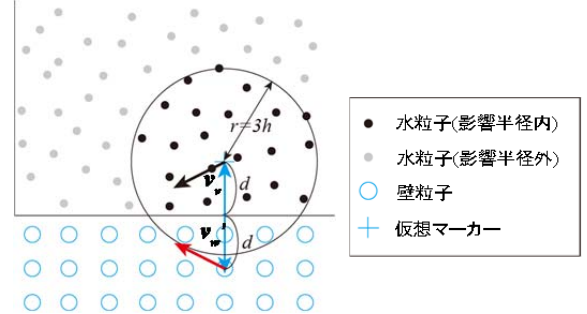


図-1 仮想マーカー境界

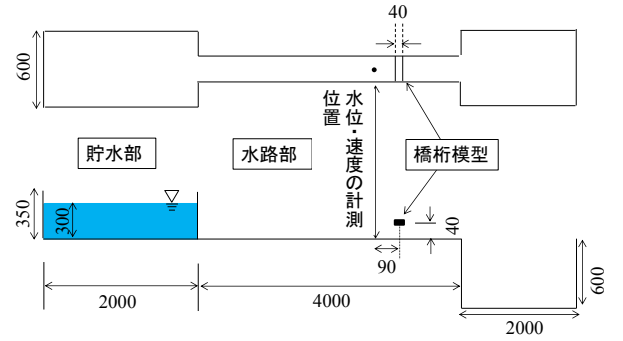
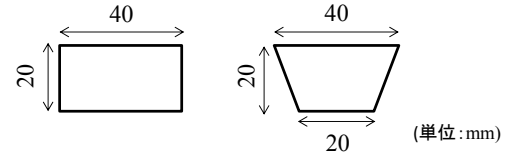


図-2 解析モデル



(a) 長方形断面 (b) 逆台形断面

図-3 橋桁模型

非すべり条件を満足させるには、壁粒子とそれに対応するマーカーとの中点（境界面上にある点）を中心点とし、仮想マーカー上での流速 v_v と点対称な流速となればよいので、点対称テンソル R を用いて次の変換式より壁粒子に速度を与える。

$$v'_w = R v_v, \quad R_{ij} = -\delta_{ij} \quad (4)$$

さらに、実用上はすべり条件と非すべり条件の両条件を融合した条件になると考えられるので、係数 β ($0 \leq \beta \leq 1$) を用いて次式により一定の割合で両条件をコントロールすることができる。

$$v'_w = \beta M v_v + (1 - \beta) R v_v \quad (5)$$

3. 精度検証

本研究では、橋桁に作用する津波流体力評価を目的として実施した中尾・伊津野らの実験³⁾を検証例題とした。この実験は、貯水部に溜水した水を前面に取り付けたゲートを開けることで段波状の津波を発生させ、橋桁模型に衝突させるものである。橋桁模型の前部位置での波頭速度と水位を実験による計測結果と比較し、その後、模型に作用する流体力を比較した。なお、本研究では、貯水高さを 300mm とした結果との比較をした。解析モデルは図 - 2 に示すように実験模型と同寸法のまま三次元モデルを作成し、橋桁モデルとしては、図 - 3 に示すとおり、長方形断面と逆台形断面の場合の比較検証例を行った。今回は長方形断面のみ結果を紹介する。本解析は時間増分 0.001s、粒子径を 0.5cm としたことで、総粒子数が約 800 万となっている。

4. 解析結果

はじめに、波頭速度に関して解析結果と実験結果を比較する(表 - 1)。なお、実験ではゲートから水位計測位置までの距離(2910mm)をゲート開扉からの到達時間で除することで波頭の進行速度を算出し、解析でも同様に水柱崩壊が開始してから水位計測位置に到達するまでの時間で除して算出した。

固体壁の流速に関して、従来の SPH 法において簡易的によく用いられる速度ゼロ条件(壁粒子は水と同じ密度を与え、流速はゼロと仮定する)を与えた結果、実験値の 2.20m/s よりも若干遅い流れとなった。本提案手法では、第 2 章の式(5)を用い、実験で得られた流速を参照し、 β に関してキャリブレーションを行った。今回の例では $\beta=0.8$ が最適な設定となったが、これは粒子間隔と境界層厚さとの関係に大きく依存するものである。

次に、橋桁模型の前部位置で計測した水位変動の比較を図 - 4 に示す。解析による水位は、評価位置を通過する粒子の中で最大の高さに位置する粒子位置として計測した。この結果から、今回のキャリブレーション値は実験で計測した流速と一致させるように設定したことから、水位変動の立ち上がり開始時間を含めて概ね実験の計測結果と一致した結果が得られた。しかしながら、特に水位のピーク発現後の水位が実験値よりも若干高くなっているため、今後の改良が必要である。

図 - 5 には、橋梁模型に作用する流体力の時間変動の比較を示す。なお、実験結果が 15Hz のローパスフィルタ処理を施していたため、解析結果においても同じ処理を施した結果と比較した。この比較検証結果より、

キャリブレーション値を与えた解析結果が実験結果を概ね再現できていることがわかる。また、従来の SPH 法で簡便的に用いられる速度ゼロ条件による結果と今回の解析結果とを比較する。従来の方法では、速度の境界条件に加え、圧力に関するノイマン条件も厳密に満足するものではない。同図に示すように、従来法では流体力の最大値が実験値の半分にも満たない結果となり、適切に境界条件が満足されていないためだと考えられる。

5. おわりに

以上の検証結果から本研究で用いた仮想マーカーを用いた境界処理法を適用することで、従来の簡易的な境界条件処理方法時と比べ、大幅に精度の良い結果が得られた。ただし、流体力の最大値に関しては、解析結果が実験値の約 80%と若干低い結果となっている。今後は、解析の解像度を上げることで解の改善を図り、同時に実験模型と同様のゲートのモデル化を検討することでより高精度な解を実現する予定である。

表 - 1 波頭速度の比較

	波頭速度(m/s)
実験値	2.20
従来法(速度ゼロ条件)	1.84
提案手法(キャリブレーション値)	2.24

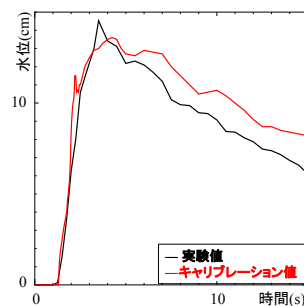


図 - 4 水位の比較

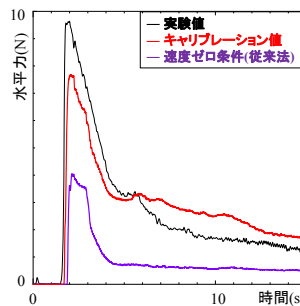


図 - 5 水平力の比較

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, 藤本啓介ら: 階段状の非適合境界を有する粒子法解析における仮想マーカーを用いたすべり・非すべり境界処理法, 計算工学論文集, No.20130011, 2013.04.
- 3) 中尾尚史, 系永航ら: 基本的な断面形状の橋梁に作用する津波外力に関する実験的研究, 応用力学論文集(土木学会論文集 A2 特集号), Vol.67, No.2, I_481-I_491 (2011)