

粒子法による津波が橋桁に作用する際の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
立命館大学 正会員 伊津野 和行

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よる津波によって、沿岸地域の国道を含む重要な橋の上部構造が流され、震災後の支援活動に支障をきたした。東日本大震災の発生からおよそ3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・津波に対して、橋桁の流失対策が進められており、橋桁に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

2.1 SPH法

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。本研究では特に、非圧縮性流体解析用に開発されたIncompressible SPH(以降、ISPH法と略記)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]を採用しているが、詳細は文献を参照されたい。

2.2 境界処理法

本研究では図-1に示す仮想マーカー(以下マーカーと称す)を用いて、Ghost粒子を用いた境界処理法を改良し、流速に関するすべり条件(あるいは非すべり条件)と圧力のノイマン条件を満足する境界処理方法を適用し、その精度を検証した。今回は、流速に関する境界処理法のみ、以下にその手順を簡単に示す。

まず、マーカーは壁境界面を挟み壁境界粒子と対称な位置に配置する。次に、マーカー上での流速をSPH法の考えから内挿する。ここで、マーカーはSPH法の近似に直接関与せず、壁粒子に適切な物理量を与えるための計測点として使う。すべり条件を満足させるには、壁粒子はマーカー上での流速 v_v と鏡映対称な流速

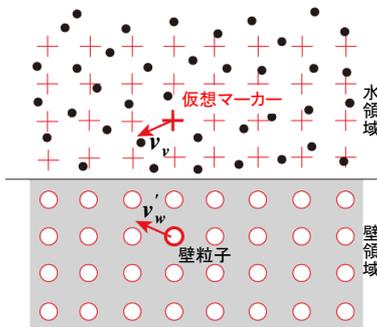


図-1 仮想マーカー境界

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。

$$v_w' = Mv_v, \quad M_{ij} = \delta_{ij} - 2n_i n_j \quad (1)$$

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 を用いて与えられる。

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、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。

$$v_w' = Rv_v, \quad R_{ij} = -\delta_{ij} \quad (2)$$

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 $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$ 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。

$$v_w' = \beta Mv_v + (1 - \beta)Rv_v \quad (3)$$

ここで、 β は粒子間隔が境界層厚さより大きい場合に、境界面に対してすべり条件を付与する割合を示し、粒子間隔に応じて調整が必要なパラメータである。

3. 精度検証例

3.1 解析概要

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^[2]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急開す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行った。橋桁モデルとしては、長方形断面と逆台形断面の場合の比較検証を行ったが今回は逆台形の場合のみ結果を紹介する。数値解析においては、実験模型と同寸法のまま三次元モデル(図-2)を作成し、解析を行った。粒子径は0.5cm、時間増分は0.001s、総粒子数は約800万である。解析には九州大学のスパコン、FUJITSU PRIMEHPC FX10を用いた。

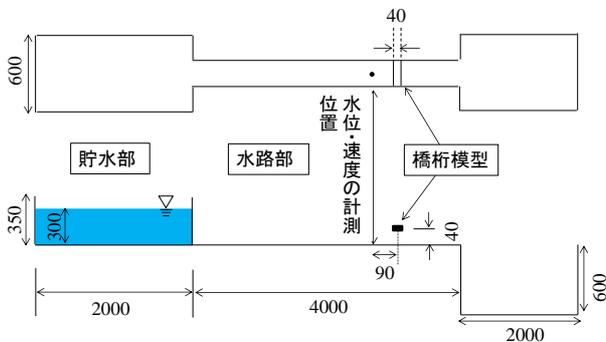


図-2 解析モデル

3.2 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とを比較する(表-1)。境界条件に関しては、固体壁および水路部の側壁の両者に対し、すべり条件、非すべり条件のいずれかの同一の条件を与え、解析を実施した。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。

固体壁および水路部の側壁の流速に関してすべり条件と非すべり条件を与えた結果、すべり条件を用いた結果は実験値の2.20m/sよりも速く、非すべり条件を用いれば、逆に実験値よりも遅い流れとなった。そこで、両条件を調合した条件を与えることにし、第2章の式(3)を用いて、境界面に対しすべり条件を付与する割合を示す β に関してキャリブレーションを行い、実験とほぼ同じ流速を与える最適な $\beta(=0.8)$ を評価した。なお、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

表-1 速度の比較

	波頭の速度(m/s)
実験値	2.20
すべり条件	3.06
キャリブレーション値	2.24
非すべり条件	1.71

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。

図-3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、どの条件においても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。しかしながら、波頭速度を考慮すると、今回の解析ではキャリブレーション値が最も実験結果を再現できていると考えられる。ただし、流体力のピーク値に関しては実験結果よりも若干低い値となっており、ゲートの開閉および貯水部出口のベルマウス形状をモデル化しなかったことが影響を与えたものと考えられる。

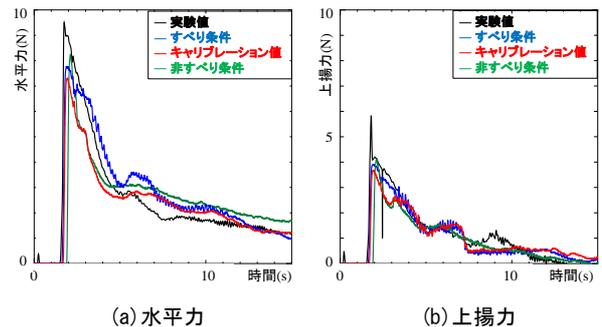


図-3 流体力結果

4. おわりに

津波流体力の評価を、想定した小型模型実験結果との比較検証により、数値解析の精度を確認し、十分に実用的な範囲で流体力を予測可能であることを確認した。今後は橋桁の流失過程を正確に追える数値解析技術の構築を目指す。

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] 中尾尚史, 糸永航, 松田良平, 伊津野和行, 小林絃士: 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)