

粒子法による津波が橋桁に与える流体力の予測とその検証

九州大学 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での津波被害により、多くの土木構造物が崩壊し、沿岸地域の防災・減災技術の早急な見直しが必要となっている。津波による沿岸地域の防災・減災技術の見直しをするために、まずは、広域の津波遡上解析による大まかな津波の挙動を把握する必要があるが、現段階では、広域の津波の流速分布が与えられたことを前提とし、局所的に構造物にはたらく流体力を把握することにした。また、これまで橋梁構造物に対する具体的な津波対策が定まっていないことから、津波が桁に与える継続的な流体力を数値解析により評価することを目的とした。解析手法は、津波の挙動を三次元的にかつ、正確に把握するために、流体解析では大変形解析に強いとされる粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法を採用した。

2. 解析手法の概要

SPH 法とは、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 (ISPH) 法の改良案である非圧縮条件緩和型 ISPH 法⁽¹⁾を用いているが、詳細は文献を参照されたい。

3. 解析例

今回橋桁に作用する流体力の検証例題として、中尾ら⁽²⁾によって行われた実験結果を採りあげた。この実験では、水柱崩壊により津波を模擬した段波状の波が橋梁模型に衝突し、波が桁に衝突しなくなるまでの流体力を計測している。この実験に用いられた模型を図-1に示す。解析モデルについては、全体図を図-2に、橋梁模型の詳細を図-3にそれぞれ示す。ここで、解析モデルの全体図において後方にタンクを設けているのは、橋梁模型を通過した波が反射し戻ってこないように設けたものである。解析には九州大学のスパコン、fujitsu primergycx400を用いた。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(96core)
5mm	600万	0.001sec	15sec	約 120 時間

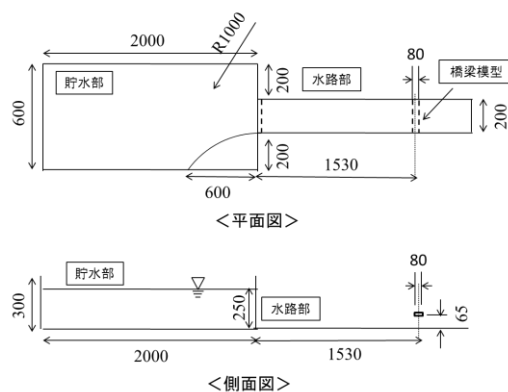


図-1 実験模型

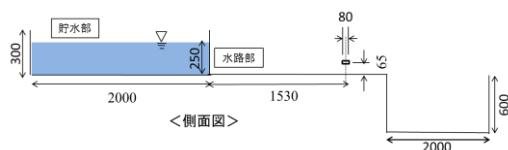


図-2 解析モデル

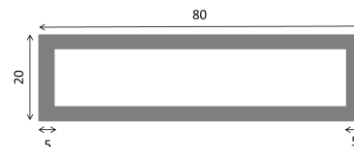


図-3 橋梁模型

4. 解析結果

図-4に実験結果と比較した解析結果を示す。図-4から分かるように青線で描かれた解析値と実験値を比べると、流体力の最大値が低く、波が模型に衝突するまでの時間が遅いことが分かる。流体力の最大値が低くなる原因として、

波が模型に衝突した際に模型内部へ貫通している水粒子が見られたことから、粒子法の境界処理について再検討した。本研究では、図-5に示す仮想マーカー(以下マーカーと称す)を用いて、流速に関する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提案し、その精度検証した。

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、マーカー上で流速と圧力を SPH 法の考えから内挿近似する。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。そして、壁粒子は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ので、式(1)より与えられる。

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

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 $n = (n_1, n_2, n_3)^T$ を用いて式(2)で与えられる。圧力ノイマン条件まで同時に満足するには、マーカー上での値を参照し、壁粒子に適切な圧力を与える必要がある。壁粒子上では速度の法線方向はゼロとなるので、壁面上での流速を v_{w0} とすると式(3)を満たさなければならない。

$$v_{w0} \cdot n = 0 \quad (3) \quad \frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho^0} \nabla P + \underbrace{v \nabla^2 u + g}_f \quad (4)$$

また、式(4)を参照すれば、この条件が成立するためには式(5)の非一

様の圧力ノイマン条件を満足しなければならない。なお、SPH 法において非一様の圧力ノイマン条件を満たすためには、マーカー上での圧力 p_v 及び外力 f_v を用い、式(6)により評価する圧力 p'_w を与えればよい。

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho f \cdot n \quad (5) \quad p'_w = \langle p_v \rangle + 2d\rho \langle f_v \rangle \cdot n \quad (6)$$

図-4 の赤線で示す境界処理改善後の結果は、解析時間の制約上まだ 5 秒程度しか解析が終わっていないが、流体力の最大値が実験と同等な値として評価できていることが確認できる。しかしながら、まだ、波が模型に衝突する時間の遅れが生じていることから、底面の流速に関する境界条件を非すべり条件へと変更するなどの改善が必要であると考えている。また、流体力が桁に作用している時間が実験値に比べて少し長いことも、今後の改善点である。

5. おわりに

現状では、基本断面を有する簡易的な橋梁モデルを用い、また桁は固定した条件に限定した実験との比較検証より、数値解析の精度を確認した。今後はより現実的なサイズ・形状の橋樑モデルに対して数値計算を実施し、また桁が移動可能条件まで対応可能な計算モデルへと変更することで、現実の橋梁に近い現象の数値解析へと発展させていく予定である。

参考文献(1)M. Asai, AM. Aly, Y. Sonoda and Y. Sakai, A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, Int.l J.for Applied Mathematics, Vol.2012(2012), Article ID 139583

(2)中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 橋梁基本断面に作用する流体力と流速・波高の関係に関する基礎的検討, 構造工学論文集 Vol.56A, pp.564-575, 2010.3.

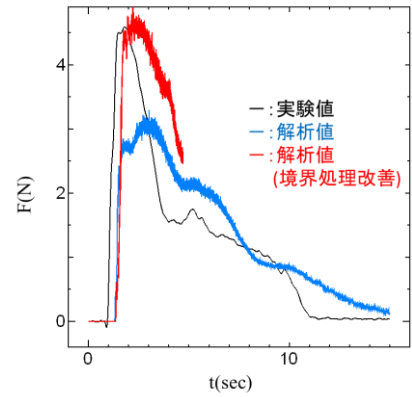


図-4 解析結果

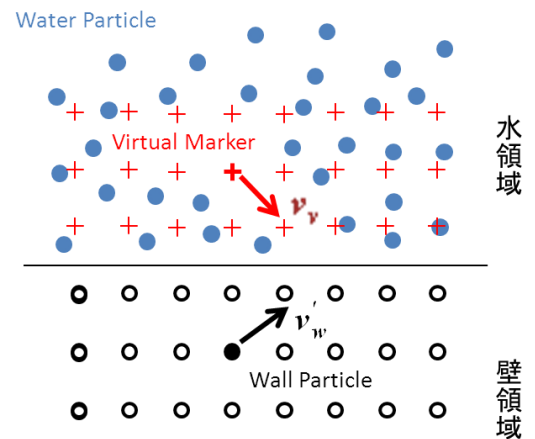


図-5 仮想マーカー境界