

粒子法による流体衝撃力評価と橋梁流失シミュレーションへの応用

Numerical evaluation of water-induced impact force and its application to the bridge wash out simulation

浅井光輝*, 宮川欣也**, 田邊将一**

Mitsuteru Asai, Yoshiya Miyagawa, Syoichi Tanabe

*博士(工), 九州大学大学院 准教授, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

**九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

Key Words: Particle simulation, Water induced impact force, bridge wash out simulation

キーワード: 粒子法, 流体衝撃力, 橋梁流失シミュレーション

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波は, 東日本の各地に甚大な被害を与えた. この津波は, 防波堤を越流あるいは崩壊させた後に陸上まで遡上し, 土木構造物などのインフラ整備だけでなく, 家屋や多くの人的被害を与えた. 今後危惧されている巨大津波が発生する前に, 沿岸地域の防災・減災技術の再検討を行うことは, 土木技術者として急務である.

このような現行の課題を受けて各地方自治体では, 迅速な避難を困難とする人々の一時的な避難のための施設として津波避難ビルの選定・指定を推進している. しかしながら, 浅海域や陸上部では地形等の影響から津波は複雑な挙動を示し, 津波避難ビルを含む陸上構造物に作用する津波の影響メカニズムの解明については未だ多くの課題が残されている. その他にも橋梁の上部構造の流失被害が各地で発生し, 交通機能に障害をもたらしたことで, 震災後の支援・復旧活動に大きな支障をきたした. 以上のように, 今後の津波防災・減災へ向けた取り組みにおいては, 各種構造物に作用する津波外力の概算が求められている. なお, 実寸大での橋梁に対する津波実験が現実的に困難であるため, 数値シミュレーションによる流体力評価および橋梁の流失被害予測は有効な手段となりえる. そこで, 著者らは近年数値流体解析分野で注目されている粒子法の一つであるSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法を用い, 津波外力評価を行うことにした. また橋梁の被害予測へと発展させるために, SPH法を流体剛体連成解析手法へと発展させた内容についても一部報告する.

2. 粒子法による流体-剛体連成解析モデル

ここでは, 本論文にて採用した非圧縮性流体解析用の粒子解析モデルを紹介し, その後に流体-剛体連成解析モデルへの応用方法を説明する.

2.1 非圧縮性流体解析用 SPH 法

非圧縮性流体問題では, 質量と運動量の保存則を満足するように, 流速 \mathbf{u} , 圧力 p を求める. ラグランジュ記述によれば2つの保存則は次式により記述できる.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \underbrace{\nu \nabla^2 \mathbf{u}}_{\mathbf{f}} + \mathbf{g} \quad (2)$$

ここで ν は動粘性係数を示し, \mathbf{g} , \mathbf{f} はそれぞれ重力加速度, 重力加速度に粘性力を加えたベクトルとする.

非圧縮性の仮定により, 質量保存則(1)は以下のように書き換えられる.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

結局, 粒子 i において, SPH法概念により重み付き平均処理を行い, 次式のように近似する.

$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt} \approx -\frac{1}{\rho_i} \langle \nabla p_i \rangle + \nu \langle \nabla^2 \mathbf{u}_i \rangle + \mathbf{g}_i \quad (4)$$

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i \rangle \approx 0 \quad (5)$$

なお, 非圧縮性流体用SPH法(以下ISPH法)では, 射影法を用い, 速度は陽的, 圧力は陰的に時間積分を行う.

2.2 境界条件処理

粒子法では、固体壁に壁粒子を配置することで流体粒子が壁に貫通させないようにしている。しかし、これは固体壁面で満足すべき圧力ノイマン条件および速度のすべり・非すべり条件を厳密に満足させるものではない。そこで、仮想マーカー境界処理法を用いれば、上記の境界条件を近似的に満足させることができる。著者らは、階段状の実際のなめらかな境界とは一致しない非適合境界のときにも処理可能な方法として一般化した。

仮想マーカー自身はSPH法の計算には直接は用いず、各種境界条件を満足する速度場および圧力を壁粒子に与えるために使用する点である。なお、仮想マーカーは、壁粒子に対して壁面に対称となる場所に配置し、たとえば、圧力に関する非一様ノイマン条件

$$\partial p / \partial n = \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{n} \quad (6)$$

を壁面で満足するためには、仮想マーカーでの値を参照して、壁粒子に適切な圧力をマッピングする。なお、 \mathbf{n} は壁の内向き法線ベクトルを示す。詳細は文献を参照していただきたい¹⁾。

2.3 剛体モデルの導入

剛体運動は、以下に示す方程式を満足する必要がある。

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} = \mathbf{F} \quad (7)$$

$$\mathbf{I} \dot{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{I} \boldsymbol{\Omega} = \mathbf{M} \quad (8)$$

ここで、はじめの方程式は剛大重心の位置ベクトル \mathbf{X} を用いた剛体の運動量保存則であり、二つ目の式が剛体重心周りでの角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ により表現した角運動量保存則である。なお、 \mathbf{F} 、 \mathbf{M} はそれぞれ剛体に作用する外力ベクトルとモーメントである。また \mathbf{I} は慣性テンソルを示す。以上の方程式は、標準的な法則（方程式）であり、ここでは流体と同様に、有限個の粒子を用いて上記の方程式を満足させることになる。なお本研究では、流体問題を解くための粒子と同じ粒子間隔で、剛体内部を粒子で充填させ、剛体運動を解くこととする。

剛体重心の位置ベクトルと2階のテンソルである慣性テンソルの成分はそれぞれ、粒子の位置ベクトルを用いて次式にて与えられる。

$$\mathbf{X}^{(I)} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \mathbf{x}_i^{(I)}, \quad I = 1, 2, 3 \quad (9)$$

$$\mathbf{I}^{(I,I)} = \sum_{i=1}^{n_p} \left\{ \sum_{(K)=1, K \neq I}^3 m_i (\mathbf{x}_i^{(K)} - \mathbf{X}^{(K)})^2 \right\}$$

$$\mathbf{I}^{(I,J)} = - \sum_{i=1}^{n_p} \left\{ m_i (\mathbf{x}_i^{(I)} - \mathbf{X}^{(I)}) (\mathbf{x}_i^{(J)} - \mathbf{X}^{(J)}) \right\} \quad (10)$$

最終的に、剛体の速度・角速度が定まれば剛体粒子上での速度ベクトル \mathbf{u} 、および位置ベクトル \mathbf{x} は次のように更新できる。

$${}^n \mathbf{v}_i = {}^n \mathbf{V} + {}^n \boldsymbol{\Omega} \times ({}^n \mathbf{r}_i - {}^n \mathbf{R}) \quad (11)$$

$${}^{n+1} \mathbf{x}_i = {}^n \mathbf{x}_i + {}^n \mathbf{v}_i \Delta t \quad (12)$$

なお、各変数の左上添え字は時間ステップ、右下添え字が粒子番号を示すものとする。

上記の手法は、DEMなどの粒子計算モデルと同様の扱いであり、SPHに特化したものではない。ただし、剛体に作用する力およびモーメントを求めるために、2.2節における境界条件処理法を用いて、構造物に作用する流体圧の精度の向上に努めていることが本論文の特徴である。

3. 数値解析例

ここでは津波避難ビルに作用する流体力評価事例と橋梁上部構造の流失被害の再現解析事例を紹介する。

3.1 津波避難ビルに作用する流体力評価

図-1 に示す条件のもと、ビルに作用する流体力を評価した事例を紹介する。なお、津波避難ビルモデルとしては、図-2 に示す開口部の有無、ピロティを設置した場合の3ケースを用意した。

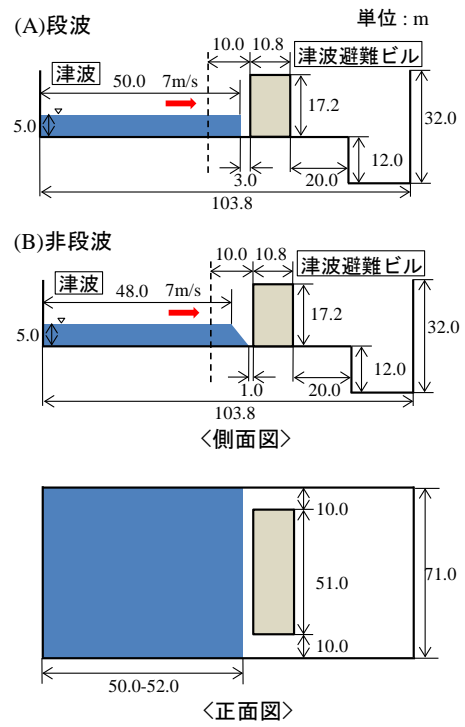


図-1 津波避難ビル解析条件

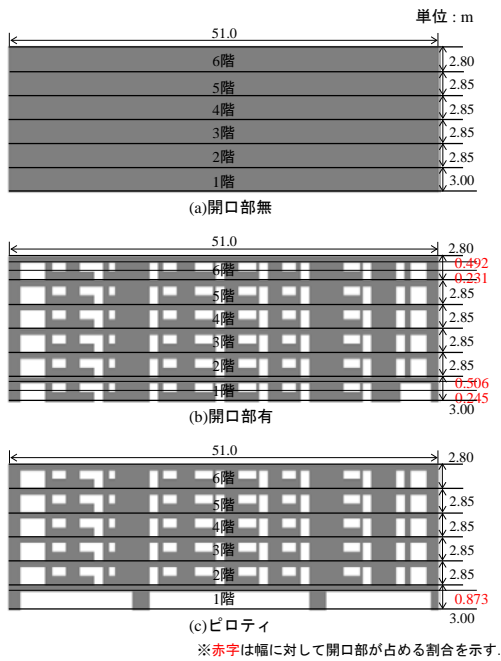


図-2 津波避難ビル解析モデル一覧

なお、数値解析により得られた値は国土交通省国土技術政策総合研究所（以下、国総研と略記）による開口部を持つ構造物に関する津波波力算定式²⁾による評価値を比較しながら、開口部の影響を議論する。図-3には開口部有モデル時の解析事例の一部を示し、算出した流体力の比較結果を図-4にまとめて示す。同図中の破線が国総研による算定結果、点によるプロットが数値解析結果の平均値である。なお、ここで平均値とは100Hzのローパスフィルタをかけた際の最大値を平均値と呼んでおり、実際にはノイズが含まれた結果となっており、ノイズを含んだバラつきを棒状のプロットで与えることにした。

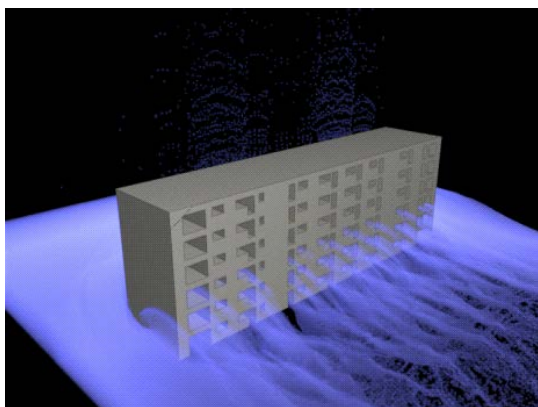


図-3 開口部有モデル時の解析結果例

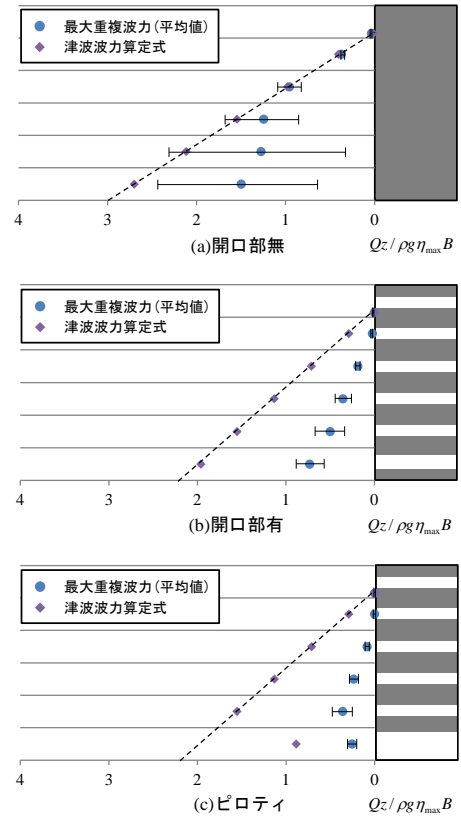


図-4 無次元最大重複波力の鉛直分布

本数値解析結果によれば、国総研による算定式は開口部がない場合にはほぼ同程度の値を示しているものの、開口部がある場合には過大評価となっている可能性を示している。ちなみに、国総研の算定式は開口部がない構造形式を用いた小型実験より作成した朝倉ら³⁾による流体力評価式を参照しており、開口部の影響は単に断面積の低下による低減のみを考慮しており、改良の余地があるといえよう。しかしながら、現状の算定式は安全側の評価をしていることから、現時点での評価でも問題はないものと判断した。

3.2 橋梁上部構造の流失被害の再現解析

次の例題として、橋梁上部構造の流失被害予測事例を示す。解析モデルの概要は図-5に示す。同図に示すように橋梁上部構造の形状はII桁モデルを採用し（図-6）、津波を模擬した波が同モデルに衝突した際の流失挙動を調べる。流入条件として初速10m/sを津波全体に与え、解析モデル左端部から27mの位置に継続的に10m/sの波を与えることで、津波高を保ったまま模型に衝突させるようにした。剛体の密度は鉄筋コンクリートを想定し、 2450kg/m^3 とした。剛体と壁のポアソン比は鉄筋コンクリートの一般的な値0.28を採用した。なお、今回は計算コストを減らす目的から、時間増分を大きくとったため、実際の鉄筋コンクリートの弾性係数 200kN/mm^2 よりも小さめの値を入力した。解析条件は粒子間隔が0.25cm、

時間増分が0.0005sec, 総粒子数は約120万である。

図-7に解析結果を示す。なお、上部構造は緑、橋脚は赤、水は青で色付けしている。同図より、津波が上部構造に衝突した後、上揚力により持ち上げられ、その後上部構造が回転を伴いながら流失していく様子がわかる。また、橋桁と橋脚の間に接触力がはたらくことで、桁と橋脚との間に貫通はみられず、著者らが想定した流失挙動と概ね一致した。

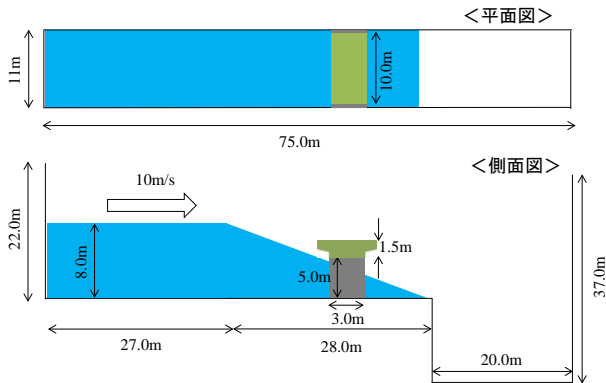


図-5 橋梁流失解析モデルと流入条件

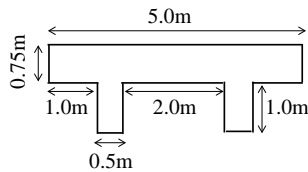


図-6 I桁モデルの詳細

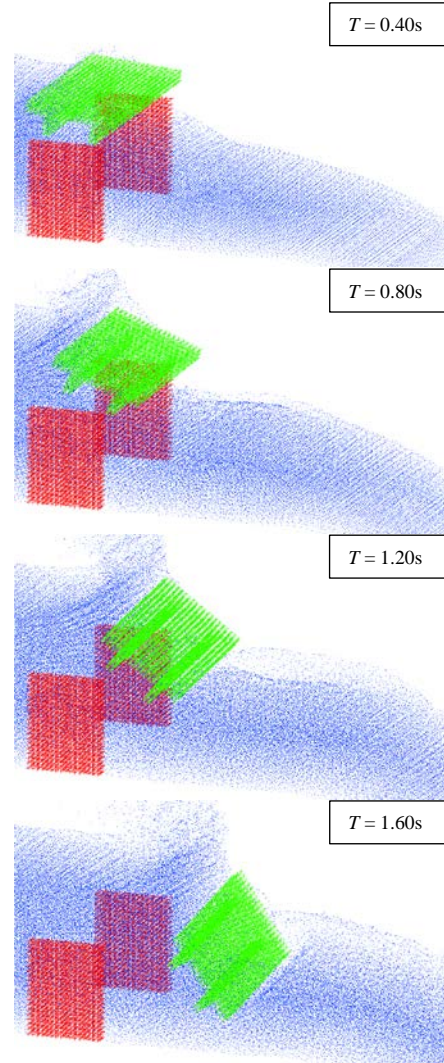


図-7 流失挙動の時間変化(鳥瞰図)

4. おわりに

本稿では、今後の津波防災・減災に資する数値解析技術の確立へ向けた取り組みとして、粒子法による流体衝撃力評価とそれを応用した橋梁流失再現シミュレーションの現状を報告した。これまでに粒子法の改良等により、流体力については十分に実用的な精度で予測できるまでになってきた。今後は、既存の設計式では困難な複雑な構造物へ作用する流体力評価などで活用が期待できる。それ以外にも今回紹介した事例のように、橋梁の上部構造の流失現象の再現などへも応用が期待でき、実務へと応用する前に再度詳細な検証と妥当性の確認を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 浅井光輝, 藤本啓介, 田邊将一, 別府万寿博: 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.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所 一般社団法人 建築性能基準推進協会 協力 独立行政法人 建築研究所: 津波避難ビル等の構造上の要件の解説, 2012
- 3) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊, 藤井直樹, 大森正則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, 2000, 土木学会, 911-915