

粒子法による流体剛体連成解析の精度検証と妥当性確認

九州大学大学院 学生会員 ○大屋 朋子
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
筑波大学 正会員 磯部 大吾郎

1. はじめに

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波により、2万人近い死者・行方不明者が出ただけではなく、多くの社会インフラ構造物も津波により被害を受けた。インフラ構造物の中でも橋梁に関しては、宮城県仙台市から太平洋沿岸を上る国道45号に沿って、上部構造の流失が多数見られた。この流失被害により、被災地への救援活動の遅れや、被災地の復旧・復興にも遅れが生じた。この被害を受け、橋梁構造物の重要性が再確認され、早急な橋梁への津波対策が求められている。本研究では、数値シミュレーションによる事前予測と対策検討に向けて、その事前段階として津波が橋梁に作用する流体力や橋梁上部構造の流失挙動解析の精度検証と妥当性確認を実施することにした。過去の研究により、本研究で採用した粒子法による津波流体力評価については、小型模型実験¹⁾の結果と解析結果の比較を通して精度確認済みである。そこで本研究では、流体剛体連成解析による剛体運動に焦点をあて、精度検証・妥当性確認を実施することにした。

2. 解析手法

本研究で使用したSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法による剛体流体連成解析手法について概説する。

2.1 SPH法の基礎式

SPH法では、連続体を有限個の粒子に離散化し、対象とする粒子の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。粒子 j の質量 m^j 、密度 ρ^j とし、重み関数を W 、影響半径を h とすると、物理量 $f(x)$ は以下の式で表される。

$$f(x) = \sum_{j=1}^N \frac{m^j}{\rho^j} f(x) W(x - x^j, h)$$

流体運動の支配方程式として、ナビエ・ストークス方程式を解く。本解析では、非圧縮性流体に適した解法とされる安定化ISPH(Incompressible SPH)法²⁾を採用した。

2.2 流体剛体連成解析法

流体剛体連成解析には、速度ベースと外力ベースの2つの定式化に大別させる。前者は越塚³⁾が提案した方法であり、後者は境界面での力の伝達として基本物理に従って解析する方法である。本研究では後者の外力ベースの手法を採用した。

流体剛体連成解析の計算のアルゴリズムを図-1に示す。速度ベースの定式化は、一旦は剛体の密度を持つ流体として解析し、剛体運動を満足させるために強制的な拘束を与えることで剛体粒子の速度や位置を更新する。一方で、外力ベースの定式化では、流体はナビエ・ストークス方程式に従い解析し、剛体は並進方向と回転方向の運動方程式を解き、剛体粒子の速度や位置を更新する。なお、剛体境界での圧力評価は、著者らのグループで開発している仮想境界処理法に従い、圧力計算を実施した。

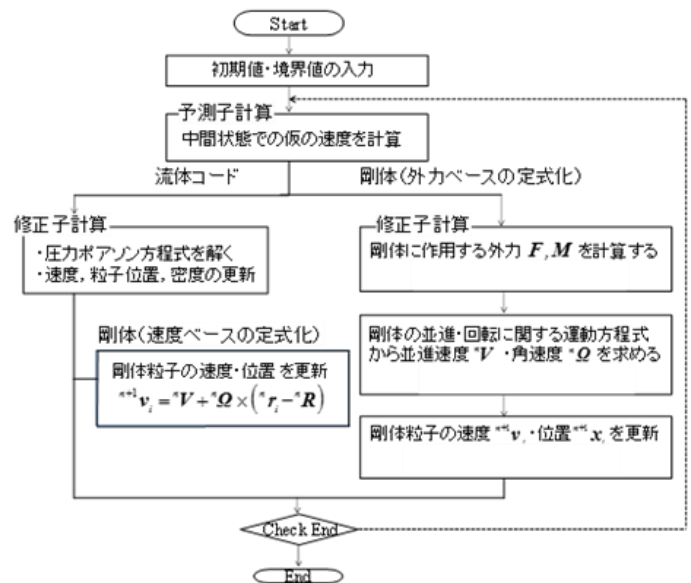


図-1 計算のアルゴリズム

3. 解析方法の精度検証

妥当性確認としての最終目標は、東北地方太平洋沖地震で発生した津波により8径間の橋梁上部構造が流失した宮城県の歌津大橋を実スケールで解析し、被害調査結果と比較検討を行うことである。

本研究では、実スケールでの妥当性確認を実施するまでの事前段階として、小型スケールの実験と計算の比較を段階的に行い、その精度確認を実施する。まず1ケース目は橋梁上部構造を矩形断面と簡略化した矩形モデルを用い、次に実際に被害にあった歌津大橋の桁断面を縮小した小型モデルを採用することで、形状の影響等までを議論する方針とした。

3.1 水理実験の概要

立命館大学で実施した水理模型実験の概略図を図-2に示す。この実験では、ゲートを急開することで貯水部に溜めた水を放流することで、上部構造を模擬した模型に衝突させ、この際の上部構造の運動を計測した。本研究で用いた模型の断面図及び寸法を図-3に示す。模型運動の計測には3D モーションキャプチャシステムを利用し、耐水機能のある自発光マーカーを模型上部に設置し、模型が流失する際の回転角度（奥行き方向）と流失の挙動を記録した（図-4）。なお、初期の貯水高さは250mmとし、実験結果と比較を行った。

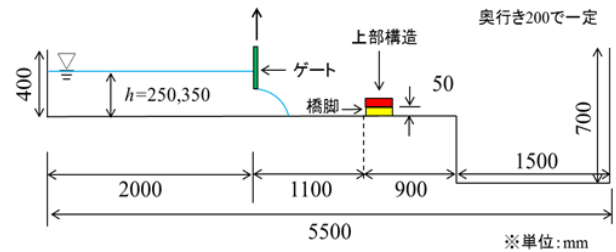


図-2 水理実験の概略図

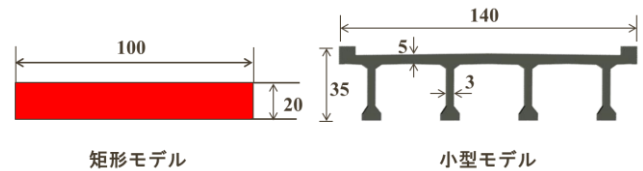


図-3 上部構造の断面図



図-4 回転角度

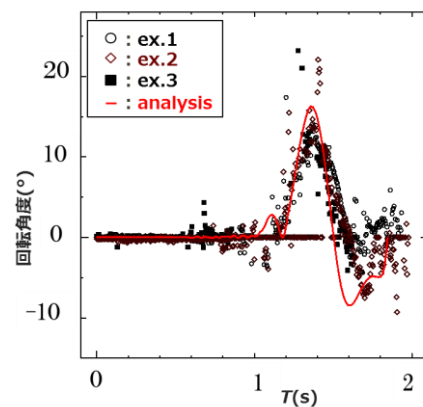


図-5 解析と実験の回転角度

3.2 矩形模型実験

まずは矩形模型を用いた水理実験と解析結果を比較した。解析条件は粒子径を0.25cmに設定したことで、総粒子数は約1200万となった。また、時間増分は0.0005secで実時間は1.6秒程度である。

図-5に数値解析と水理実験の回転角度の結果を示す。各実験結果にばらつきがあるため、3回の実験結果と数値解析による計算結果を比較した。実験結果と同様に、数値解析の結果も津波が衝突した後、回転角度が正から負へと移行する傾向が見られた。

3.3 実形状・小型模型実験

次に、実際の桁形状を有する小型模型による水理実験と数値解析結果を比較した。解析条件としては、粒子径を0.20cmに設定し、総粒子数は約2100万となった。また、時間増分は0.0005secで実時間は2.5秒程度である。

図-6に水理実験と数値解析により得られた上部構造流失の様子を比較する。上部構造が橋脚から落下する直前までは類似した傾向が見られたが、落下後の挙動は異なる結果となった。その要因としては、水理実験では手でゲートを開けるため、段波が発生し上部構造に当たっていたのに対し、解析では段波を再現できていなかったことが挙げられる。

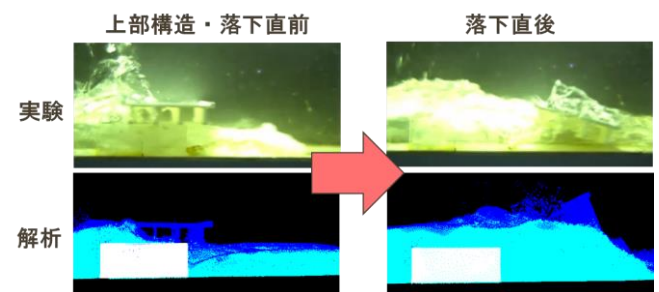


図-6 流失の挙動

4. おわりに

- 津波時の橋梁上部構造の流失被害を数値解析で再現するために、まずは小型模型実験との比較検討を通して、数値解析結果の精度検証・妥当性確認を実施した。数値解析結果により、より単純な形状である矩形模型実験を再現することができたが実形状・小型模型を用いた実験ではより複雑な剛体運動を示し、両者は同様な結果を得るには至らなかった。その主因としては、ゲート急開のモデル化に差異が生じていることが挙げられる。
- 今後は、実験と計算結果の相違がどの段階で生じているのか詳細を考察したのちに、実験と同様な条件で数値解析を実施することで、両者が一致した結果が得られるものと考えている。
- 参考文献
- 1) 田邊将一, 浅井光輝, 中尾尚史, 伊津野和行: 3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.293-302, 2014.
 - 2) M. Asai, AM. Aly, Y. Sonoda and Y. Sakai, A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, Int. J. for Applied Mathematics, Vol.2012(2012), Article ID 139583
 - 3) 越塚誠一: 「粒子法」, 丸善(2005)