

粒子法によるマルチスケール津波解析法を用いた橋梁流失シミュレーション

九州大学大学院 学生会員 ○宮川 欣也
九州大学大学院 正会員 浅井 光輝

1. 緒言

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、沿岸地域の土木構造物に甚大な被害が発生した。特に、橋梁における上部構造の流失は、交通システムの混乱を引き起こし、震災後の復旧・支援活動に支障をきたした。震災から数年が経過した現在、今後危惧される巨大地震に伴う津波に対して、橋梁における防災・減災技術の再検討が積極的に行われている。

これまでの研究で、筆者らのグループでは、固定した小型モデルに作用する流体力評価を実施し、実験値をある程度精度よく再現することができている。そこで本研究では、次の段階として、震源から構造物周辺までのマルチスケール津波解析を提案し、最終的な詳細解析においては流体剛体連成手法を用いた剛体移動シミュレーションにより、東日本大震災で被害が確認された橋梁の流失解析を行った。

2. マルチスケール津波解析

一般的に津波の数値解析手法としては、浅水長波理論に基づく2次元津波解析と、Navier-Stokes式を直接解く3次元津波解析に大きく分けることができる。2次元津波解析は計算コストの小ささから、比較的短時間に解析を行える点において有用であるものの、圧力を静水圧より導出することから、構造物に作用する津波流体力を正確に推定することは不可能である。一方、3次元津波解析は2次元津波解析の持つ圧力等の問題を解決できるといった利点があるが、計算コストでの制約が大きく、震源からの津波伝播解析を行うことは現実的ではない。そこで本研究では、両者の利点を生かし、震源から湾口までの津波伝播解析を2次元差分法、湾口から内陸までの津波遡上解析と構造物周辺流れの解析を3次元粒子法で解析を行うこととし、このように解像度を変えた多段階解析のことをマルチスケール津波解析と呼ぶ(図-1)。

3. 解析手法

SPH法は、解析対象である連続体を有限個の粒子に

津波伝播解析(2D差分法)	津波遡上解析(3D粒子法)	構造物周辺流れ(3D粒子法)
解像度10m~100m	解像度1m~5m	解像度5cm~50cm
震源~湾口	湾口~内陸部	構造物周辺

図-1 マルチスケール津波解析の概要

離散化し、対象とする粒子の物理量を影響半径内の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。SPH法の基礎式を以下に示す。ここで、 W は重み関数を示している。

$$f(x_i) \approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{P_j} (x_j) W(|x_i - x_j|, h) \quad (1)$$

本研究では特に、非圧縮性流体解析用に改良された、安定化ISPH法を採用した。なお、安定化ISPH法の詳細は文献を参照されたい^[1]。

本研究では、この安定化ISPH法のアルゴリズムに剛体の動きを表現する式を組み込むことで、流体剛体連成解析を試みた。以下に手法の詳細を説明する。

まず、解析モデル作成時に剛体も流体と同様に粒子へ離散化する。次に、剛体表面に作用する流体力 F_f と、剛体と固定境界に作用する接触力 F_e のみであると仮定し、次式より剛体表面に作用する外力を算出する。

$$F_f = \sum_{\text{On the surface}} P_i \Delta S_i n_i \quad (2)$$

$$F_e = k \delta^3 \quad (3)$$

$$k = \frac{4\sqrt{r}}{3} \frac{E_i E_j}{(1-\nu_i^2)E_j + (1-\nu_j^2)E_i} \quad (4)$$

ここで、剛体と固定境界に作用する接触力は、ヘルツの弾性体接触理論を用いてモデル化を行った。また、剛体表面に作用する外力より、流体力によるモーメント M_f 、接触力によるモーメント M_e は以下のように算出した。

キーワード 粒子法, マルチスケール津波解析, 橋梁流失被害予測

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 九州大学大学院工学研究院 浅井光輝 TEL 092-802-3373

$$M_f = \sum_{\text{On the surface}} (r_i - r_j) P_i \Delta S_i n_i \quad (5)$$

$$M_e = \sum_{\text{On the surface}} (r_i - r_j) F_e \quad (6)$$

ここで、 P_i は剛体表面粒子の圧力、 ΔS_i は剛体表面粒子の面積、 n_i は剛体表面粒子の内向き法線ベクトルである。その後、求めた外力とモーメント力より求められた剛体の並進速度 T 、回転速度 ω から剛体粒子の速度は次のように与えられる。

$$u_i^{n+1} = T_i^{n+1} + \omega_i^{n+1} (r_i - r_j) \quad (7)$$

なお、水粒子に関しては通常通りの手順により状態の更新を行う。

4. 解析例

前節で説明した流体剛体連成解析手法を用いて、宮城県南三陸町歌津大橋を模した橋梁上部構造の流失シミュレーションを実施した。歌津大橋は東日本大震災において、全 12 径間の内、計 8 径間(第 3~第 10 径間)の上部構造流失が報告されている。ここではまず、マルチスケール津波解析を実施する前に、単一径間(第 8 径間)の上部構造に、任意の形状と流速を持つ津波を衝突させることで、橋梁の流失シミュレーションを行った。解析モデルの概要を図-2 に示す。ここで、流入条件としては津波高 15m を想定し、10m/s の初速を水に与え、貯水部の先端位置(30m)を通過する水に継続的に 10m/s を与える条件としている。橋脚は完全に固定し、水の密度は 1000kg/m³、上部構造の密度は鉄筋コンクリートを想定し 2450kg/m³ とした。解析条件の詳細は表-1 に示す。

表-1 解析条件

粒子間隔	総粒子数	時間増分	実時間	解析時間
6cm	約 5500 万	0.001s	3.5s	8h

図-3 に流入開始から 1.0~2.5 秒後の解析結果を示す。同図より、津波の衝突による橋梁の流失を本手法により表現できていることがわかる。また、実際の被害報告によると、今回の解析に用いた第 8 径間は、転覆して流失したと報告されている。本解析では、完全に転覆するような現象はみられなかったものの、最大で約 90 度の回転が見られ、回転を伴う流失の様子が観測できた。なお、完全な転覆が見られなかった要因の一つとして、橋梁に衝突する津波の形状、流速が実際の条件

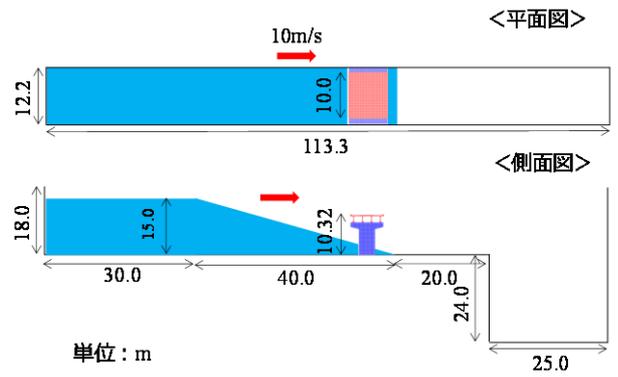


図-2 解析モデルの概要

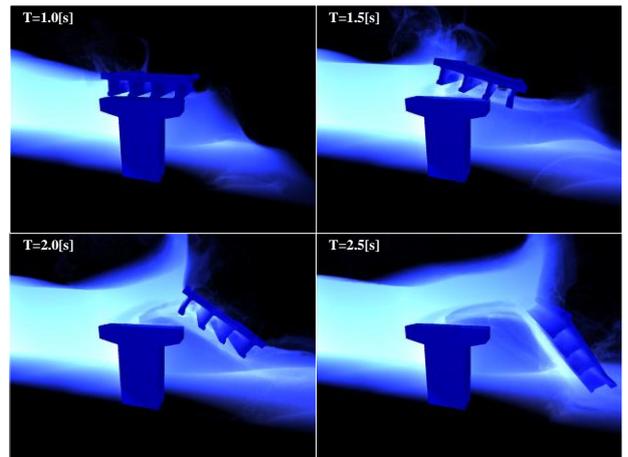


図-3 解析結果

と異なっていたためと考える。今後、マルチスケール津波解析が完成し、各スケール間で適切な情報交換が行えれば、計算精度は改善されるものと思われる。

5. 結言

本報では、マルチスケール津波解析に、最終的な橋梁流失シミュレーションを実施した。なお、最終段階の詳細解析においては、流体剛体連成機能が搭載されている。同解析ツールを用い、実スケールの橋梁における橋梁流失シミュレーションを行い、定性的に流失挙動の再現が可能であることを示した。今後、マルチスケール津波解析による各階層間での流入・流出条件の見直しを行うことで、より現実的な橋梁流失を再現できるものと考えている。

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