

粒子法に基づく橋梁に作用する津波の再現

12T0272W 菅波 慎吾
指導教員：丸山 喜久

1. 研究背景と目的

2004年スマトラ島沖地震や2011年東北地方太平洋沖地震に伴い津波が発生した際に、人的被害に加え家屋被害や道路、橋梁、港湾、上下水道施設等の被害も多数生じた。さらに、首都直下地震や東海地震、東南海地震などの大規模な地震の発生が指摘されていることから、地震に伴う津波被害を軽減するためにも、急速な対策が求められる¹⁾。

橋梁構造物については、震災時に緊急避難路や救援物資の輸送等に利用されるため、被災してしまうと復旧活動に影響が生じる。そのため、橋梁構造物における重要度は高く、津波による被災メカニズムを解明することが求められる。

そこで、本研究は、近年、流体解析の分野で実用化が進んでいる粒子法を用いて、橋梁構造物に作用する津波を再現することを目的とする。既往の推理実験を模擬する数値解析を行い、実験結果の再現性を評価する。まず、粒子法による解析精度の確認を行うために、粒子の大きさが解析結果に与える影響を検討する。さらに、庄司ら²⁾の実験水路および橋桁を数値モデルで再現し、津波が橋梁構造物に作用する際の水平波力を粒子法で解析する。

2. 粒子法の特徴

従来の流体解析の技術として、差分法や有限要素法等の格子を用いた手法がある。これらの手法には、解析領域外の計算ができない、水面変化は格子の形状に依存してしまうといった欠点が存在した。粒子法では、格子生成を必要とせず、自由表面の激しい動きを伴う流れや、界面の複雑な動きを伴う混相流について安定した解析が可能となる³⁾。

3. 粒子法による津波解析の安定性の把握

(1) 解析条件

AutoCAD で実験水路および円柱を作成し、粒子法の解析ソフトウェアである Particleworks の解析用モデルとした（図-1）。初期状態は静水深はないものとし、図-1 に示す実験水路モデルの左側面から粒子を流速 0.5m/s で流入させ、5 秒間の数値解析を行った。流入する際の 1 粒子径は、実験水路の高さ 300mm を層数で分割したものに対応する。粒子層は 7 層、12 層、15 層、17 層、20 層、21 層の 6 ケースとした。また、解析による流速の計測点は、円柱背

面端部より 500mm 後方の円柱中心軸上とした。

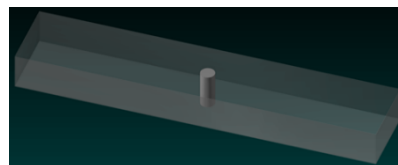


図-1. 粒子層数検討の際の水利実験モデル

(2) 解析結果

得られた流速を図-2 に示す。各ケースとも流入開始から約 1 秒後に最大流速を示すことは共通している。実験水路モデルの中央部に設置した円柱の影響によって、充分時間が経過すると流速は減少する。粒子層が 7 層と 12 層の場合に関しては、他の場合と比較して、速度の時刻歴波形の変動幅が大きく、解析結果が安定していないように見える。一方で、粒子層が 15 層以上の場合では、速度の時間的変動も少なく、安定していることがわかる。これらの結果から、本研究で扱う Particleworks では、粒子層が 15 層未満だと解析結果が時間的にも空間的にも不安定となる傾向があることが確認できた。また、粒子層が 15 層以上になると、安定した解析が可能になる。

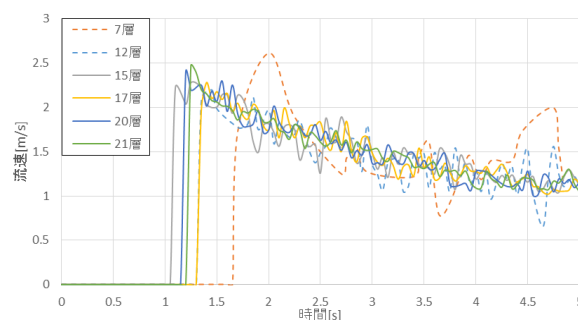


図-2. 円柱背後の流速の時刻歴波形の比較

4. 既往水理実験結果との比較

(1) 解析条件

庄司ら²⁾は、橋桁に作用する津波波力に関する水路実験を行った。本研究は、この実験のドライベッド上の遡上波を対象に数値解析を行う。CASE24-2, CASE25-3, CASE28-1 の 3 ケースの水平波力（実験結果および解析結果）を図-3 に示す。これらの 3 ケースについて、解析用のモデルを図-4 に示す。貯水部の粒子層に関しては、前項の結果を踏まえて 15 層以上となるように設定し、CASE24-2 は 23 層、CASE25-3 は 22 層、CASE28-1 は 22 層とした。

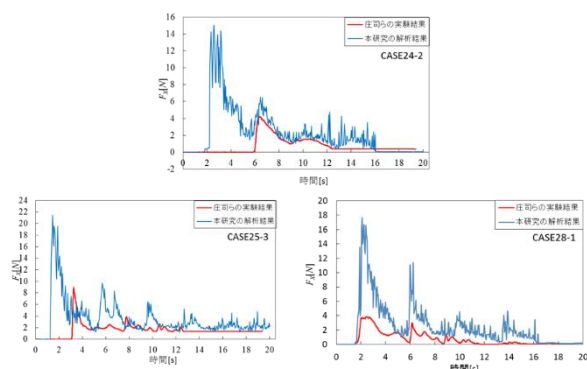


図-3. 3 ケースの水平波力（実験結果²⁾ および解析結果）

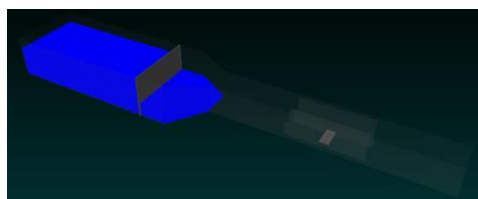


図-4. 水理実験モデル（CASE24-2）

(2) 解析結果

3 ケースの水平波力の時刻歴波形（図-3）より、CASE24-2については、2.6秒時の15.10 Nが最大水平波力となり、実験結果の4.23 Nと比較すると、3.57倍大きかった。CASE25-3については、時刻1.6秒の19.51 Nが最大水平波力となり、実験結果の8.95 Nと比較すると約2倍大きい、CASE24-2の結果よりは、時刻歴波形の形状が実験結果に近いことがわかる。CASE28-1については、時刻2.1秒の17.66 Nが最大水平波力となり、実験結果の3.86 Nと比較すると、約4倍大きい。実験結果と解析結果の時刻歴波形を比較すると、大きな水平力が現れる時刻は実験結果と解析結果が比較的一致していることが分かる。このように、解析結果は実験結果より水平波力が大きい結果となった。これは、粒子法では圧力振動³⁾という粒子の振動現象が発生し、作用力の再現精度に影響したものと考えられる。

そこで、圧力振動現象を軽減するために、設定条件において圧力振動抑制モデルを導入し、さらに、実験水路の摩擦や水の粘性について考慮するため、動粘性係数に影響するスリップ条件を設定した。さらに、CASE28-1について、水平波力に加えて橋桁前の波高と流速の解析を、解析時間と計算負荷を軽減するために2次元解析で行った（図-5）。橋桁前波高については、最大9.91cmとなり実験結果の7.19cmと比較すると1.38倍大きく、解析前半部では、比較的一致していることがわかる。さらに、水平波力は、最大4.00Nで実験結果の3.89Nより1.03倍の解析結果となり、橋桁前流速は、最大128cm/sで実験結果の116cm/sより1.10倍の解析結果で両結果とも実験結果とほとんど差がない結果となった。

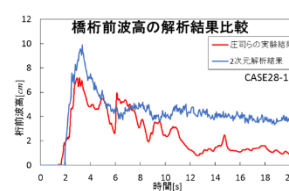
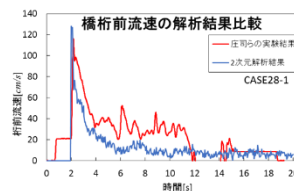
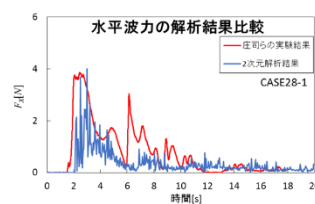


図-5. 2次元解析による各物理量の解析結果（CASE28-1）

5. まとめ

本研究は、粒子法による津波解析結果の安定性を把握するために、粒子層数を変化させて流速を比較した。それぞれの解析結果を比較すると、7層と12層の場合で流速の時間的および空間的な変動が大きいたことが確認できた。一方で、これらを除いた15層、17層、20層、21層の場合については、比較の変動も小さく、安定した解析結果だった。このことから、今後の解析を行う上での粒子層の設定を15層以上とすると、解析精度の向上が見込めるものと考えられる。

さらに、既往の橋桁および実験水路を数値モデルにより再現し、津波が橋梁構造物に作用する際の水平波力について、水理実験結果との比較を行った。本研究の解析結果は、実験結果と比べて最大水平波力が2倍以上大きかった。この理由としては、粒子法の圧力振動現象が圧力計算に影響し、作用力測定精度が低下したことが考えられた。そこで、圧力振動現象と摩擦、粘性について考慮し、2次元解析をすると、橋桁前の水平波力、流速、波高の最大値は比較的一致していることが確認できた。今後は、さらに多数のケースで数値解析の妥当性を検証し、橋梁の被災メカニズムの解明に貢献することを目指す。

参考文献

- 1) 内閣府：防災情報のページ，
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/index.html>
- 2) 庄司学，清水裕文：橋桁に作用する津波波力の水平成分及び鉛直成分の評価，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 70，No. 4，pp. I_616-I_627，2014.
- 3) 越塚誠一：粒子法入門 流体シミュレーションの基礎から並列計算と可視化まで，丸善，2014.