複数構造物に作用する津波波力に関する3次元数値シミュレーション

3D-Simulation of Tsunami Wave Force on Multiple Structures

四條利久磨¹・佐藤敏浩²・池末俊一³

Rikuma SHIJO, Toshihiro SATO and Shunichi IKESUE

In the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake, many onshore structures were destroyed by the tsunami, the wave height of which exceeded the conventional assumption. In the future, the reinforcement of tsunami disaster prevention measures will be needed, and the evaluation of tsunami wave force on onshore structures will be very important. To evaluate the tsunami wave force on onshore structures, it is necessary to deal with tsunami run-up as a three-dimensional flow. In this study, a three-dimensional simulation is applied to tsunami run-up around structures. And the applicability of the three-dimensional simulation is examined for the evaluation of tsunami wave force on onshore structures.

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震では、従来の想定を超える巨大な津波が発生し、陸上に遡上した津波によって数多くの構造物が損壊した。今後、沿岸部における津波対策の強化が求められるが、その検討に当たっては、沿岸構造物に作用する津波波力の評価が重要となる。

津波波力の評価においては、地形変化に伴う津波の変形や陸上への遡上、及び構造物との干渉等、スケールの異なる複数の現象を同時に考慮する必要がある。特に、構造物周りについては、構造物前面における遡上津波の打ち上がりや構造物背後への回り込み等の現象が津波波力の大きさに影響するものと考えられる。したがって、構造物に作用する津波波力を評価するには、遡上津波の流動現象を3次元流れとして取り扱う必要がある。

このような構造物周りにおける遡上津波の流動状況を考慮するには、3次元の数値シミュレーションが有効と考えられる。例えば中村ら(2009)は、遡上津波の変形と陸上構造物に作用する津波波力について、3次元数値シミュレーションの適用性を検討している。ただし、前述のとおり津波波力の評価には、スケールの異なる現象を同時に考慮する必要があるため、計算格子の取扱い等の面で3次元数値シミュレーションの適用には未だ制約が大きい。したがって、陸上構造物に対する津波波力の評価への3次元数値シミュレーションの適用事例は少ないのが現状である。

そこで本研究では、計算格子の取扱いが比較的容易な汎用の流体解析コードを用い、既往の模型実験に関する公開論文との比較によって、3次元数値シミュレーションの適用性を検討した。

2. 3次元数値シミュレーション

本研究では、汎用の流体解析コードとしてANSYS社のFLUENTを用いた。同コードは有限体積法をベースとした非構造格子のソルバーを有しており、非圧縮性流体から圧縮性流体まで、層流から乱流まで広範な問題をモデル化する機能を有している。

また、この解析コードでは、混相流を取扱う手法としてVOFモデルを有しており、自由表面流れの問題にも適用可能である。

ここで、計算領域における津波の生成には境界条件の取扱いが必要となるが、FLUENTでは境界条件や流れ状態のソース項等についても、ユーザー定義関数の機能を有している。ユーザー定義関数では、C言語ベースのプログラミングによって、ユーザー自身で境界条件等をカスタマイズすることができる。

本研究では、これらの機能を用いて公開論文における津波実験の再現を試み、3次元数値シミュレーションの適用性を検討した。

なお、本研究では中村ら(2009)の論文を参考として、乱流モデルにLES (Large-Eddy Simulation) を用い、自由表面の捕捉にはVOF (Volume of Fluid) モデルを用いた。

3. 垂直壁に作用する津波波圧に関する3次元数値シミュレーション

陸上構造物に作用する津波の波力/波圧は、海底地形等の影響によって変化する。朝倉ら(2000)は、直立護岸を越流した遡上津波の津波波力特性を明らかにする目的で、2次元水理実験を実施している。この実験では陸上構造物に模した垂直壁へ作用する波圧について計測が行われており、海底勾配等の条件を変化させた場合における波圧特性も検討されている。

そこで本研究では、まず朝倉ら(2000)の論文を参考

1 正会員 工修 三菱重工業㈱技術統括本部長崎研究所
2 非会員 工博 三菱重工業㈱技術統括本部長崎研究所
3 正会員 工博 三菱重工業㈱技術統括本部長崎研究所

として垂直壁に作用する津波波圧の3次元数値シミュレーションを実施し、その適用性を検討した。計算は図-1に示すように、朝倉ら(2000)の実験と同スケールの条件で実施した。

なお、本研究では、朝倉ら(2000)の実験結果から、波圧として最大となる波高0.2m・周期42s・引き波初動・海底勾配1/50のケース、及び周期が特に長い津波を除いて波圧として最小となる波高0.2m・周期42s・引き波初動・海底勾配1/200のケースを対象とした。参考として、海底勾配1/50のケースにおける護岸・垂直壁近傍の計算格子の一例を図-2に示す。ここでは、護岸・垂直壁近傍に計算格子を集約し、水面から遠方の空気層については、計算負荷の軽減を考慮し、粗い格子分割として総格子数を削減するようにしている。

計算領域における津波の生成については、流入境界条件として次式で与えられる津波の水平流速 u と水位 η を入力した。

$$u = \eta \sqrt{\frac{g}{h}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

図-1 3次元数値シミュレーションに用いた条件 ※朝倉ら(2000)を参考とした

図-2 計算格子例
(海底勾配1/50, 護岸・垂直壁近傍)

図-3 遡上水深の時刻歴波形
(垂直壁前面における遡上水深の計算結果)

$$\eta = -\frac{H}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 g は重力加速度 (m/s^2), h は水深 (m), H は波高 (m), T は周期 (s), t は時間 (s) である。式(1), (2)については、ユーザー定義関数を作成して、境界条件に組み込んだ。

また、朝倉ら(2000)の論文では、波条件は一樣水深部における値である旨が示されている。そこで、今回のシミュレーションでは、図-1のスロープ入り口(一樣水深部とスロープの境界位置)における第一波の水位の山と谷の高低差が0.2mとなるよう、式(2)の波高 H を調整した。なお、計算では、遡上した第1波による垂直壁の波圧を再現した。

図-3に、遡上水深の時刻歴波形に関する計算結果を示す。計算結果から、海底勾配1/50と1/200のケースについて、構造物前面での遡上水深に差異が生じていることが分かる。ここで、VOF値0.5の等値面として描いた水面と鉛直断面の流速コンターを併記したものを図-4に示すが、これからも海底勾配1/50としたケースは、海底勾

図-4 護岸・垂直壁近傍における水面形及び流速コンター
(流速コンターは鉛直断面の流速絶対値を表記)

図-5 波圧の時刻歴波形
(垂直壁前面における波圧の計算結果)

図-6 最大波圧の鉛直分布 (実験結果：朝倉ら (2000))

配1/200としたケースに対して、護岸を乗り越える津波水量が多いことが分かる。これは、海底勾配の違いによって、進行してくる津波先端部の進行速度に差異が生じているためと考えられる。この違いが、護岸における津波の乗り越え挙動、及び垂直壁前面での遡上水深に影響しているものと考えられる。

図-5に垂直壁前面における波圧の時刻歴波形を示す。この結果から、遡上水深と同様に波圧についても海底勾配1/50のケースの方が海底勾配1/200のケースに比べて大きなピーク値となっていることが分かる。また、波圧の波形は図-3に示した遡上水深の波形と相似となってい

る。例えば、海底勾配1/50のケースでは、 $t=45s$ 付近にて遡上水深が0.15m程度のピーク値となるが、垂直壁最下部の波圧についても $t=45s$ 付近で1500Pa程度のピーク値となり、遡上水深の静水圧相当の値となっている。朝倉ら (2000) は、垂直壁に作用する波圧が遡上水深に基づく静水圧と相似となる旨結論付けており、計算結果もこれと同様の傾向となっている。

図-6に、垂直壁に作用する最大波圧の鉛直分布を示す。図-6には朝倉ら (2000) の論文に示された実験結果の読取值を併記しているが、最大波圧が直線分布となること、海底勾配の違いによって波圧の大きさが異なることがシミュレーションでも定性的に再現されている。

4. 複数構造物に作用する津波波力に関する3次元数値シミュレーション

朝倉ら (2000) の論文では、実験水路幅とほぼ同等の幅となる垂直壁模型によって、断面2次元的な津波波力の特性に関する実験的検討が行われている。一方で、実際の構造物においては、遡上した津波が構造物前面で打ちあがるだけでなく、その流れが構造物の背面に回りこむため、現象がより複雑となる。また、構造物が複数配置される場合には、周囲の構造物との干渉によって遡上津波の波力が影響を受けるものと考えられる。したがって、実際の構造物へ作用する遡上津波の波力を評価するには、これらの3次元的な影響も考慮する必要がある。

そこで本研究では、シマモラら (2007) が実施した矩形構造物に作用する津波波力の水槽実験、及び同実験を対象とした中村ら (2009) の数値シミュレーションを参考として、複数構造物に作用する津波波力に対する3次元数値シミュレーションの適用性を検討した。

シミュレーションに用いた条件を図-7に示す。シマモラら (2007) は、水槽実験により、陸上に配置された矩形構造物に作用する津波波力を計測し、また、矩形構造物を単体で配置した場合と複数配置した場合の津波波力

図-7 3次元数値シミュレーションに用いた条件 ※シマモラら (2007), 中村ら (2009) を参考とした

の違いについて明らかにしている。

中村ら (2009) は、シマモラら (2007) の実験を対象として、独自に開発した3次元数値シミュレーションモデルの適用性を検討している。中村ら (2009) のモデルでは、SMAC法をベースとした流速と圧力の連成計算に加えて、自由表面を捕捉するためのモデルとしてMARS法 (Multi-Interface Advection and Reconstruction Solver) が用いられている。MARS法は自由表面の勾配を考慮したVOF値の輸送モデルであり、各計算セルのVOF値から自由表面を捕捉するVOFモデルの1種と考えることができる。また、この中村ら (2009) のモデルでは乱流モデルとしてLESが用いられている。

以上を参考として、本研究では図-7に示すように矩形構造物が単体配置する場合と複数配置する場合の2ケースを対象とした3次元数値シミュレーションを行った。

ここで、シミュレーションに用いた計算格子を図-8に示す。垂直壁のケースと同様に、護岸・矩形構造物近傍における計算格子を詳細に分割し、それ以外の領域を粗く分割するような構成としている。また、シミュレーションにおける津波の造波については、シマモラら (2007) の水理実験で用いられたピストン型造波板の変位波形から造波板の速度を求めて、FLUENTの移動計算格子機能により直接造波板の動きを模擬している。この方法で得られた水位波形の計算結果、及び中村ら (2009) の論文に記載された実験結果・計算結果との比較を図-9に示す

図-9 水位波形 (x: 護岸からの位置, 負値が沖方向)

が、計算領域内での津波水位が計算にて概ね良好に再現出来ていることを確認している。

図-10に、矩形構造物を単体配置した場合の護岸からの距離と最大津波波力の関係を示す。図-10には、シマモラら (2007) の論文に示された実験結果の読取値を併記しているが、矩形構造物の設置位置が護岸から離れるにしたがって最大津波波力が小さくなる傾向をシミュレーションでも定性的に再現できていることが分かる。また、矩形構造物を護岸から0.2m位置、0.4m位置に設置した場合については、定量的にも計算と実験は良好に一致している。ただし、矩形構造物を護岸から0.8m位置に設置した場合については、計算結果が実験結果に比べて大きい結果となっている。地表部及び構造物周辺の格子サイズを水平・鉛直共に1/2とした場合も、図-10と同様の結果となった。ここで、矩形構造物を単体で配置する場合、護岸と矩形構造物との間における遡上津波のエネルギーの減衰は、護岸を乗り越えた直後の3次元流動影響と地表の粗度起因する摩擦抵抗によって生じるものと考えられる。一方で、今回のシミュレーションでは、護岸を乗り越える際の3次元流動は直接再現しているものの、摩擦抵抗については地表部分に滑面に対するNon-Slip条件を付与しているのみである。したがって、今後の精度向上には粗度影響のユーザー定義関数導入が必要と考えられ、これが今後の取り組み課題といえる。

矩形構造物が複数配置される場合には、構造物との干渉影響によって遡上した津波が減勢し、後列側の矩形構造物に作用する波圧が低下する。図-11に計算結果の事

図-10 護岸からの距離と最大津波波力の関係 (単体配置の場合, 実験結果: シマモラら (2007))

図-11 圧力コンター (単体配置は護岸から0.4m位置)

例として構造物周りにおける圧力のコンター図を示すが、今回実施した3次元数値シミュレーションでもこの傾向が定性的に再現されていることが分かる。

複数配置した場合の矩形構造物に作用する最大津波波力を図-12に示す。ここに、図-12に示した結果は、複数配置した矩形構造物のうち中央に並んだ列の結果を示している。図-12にはシマモラら（2007）の論文に示された実験結果の読取値を併記しているが、計算と実験は良好に一致している。特に、複数配置のケースで後列側の波力が大きく低下する現象についても、3次元数値シミュレーションによる再現性は良好である。

単体配置の場合とは異なり、矩形構造物が複数配置される場合には、周辺構造物によって生じる3次元流動の影響が、遡上津波のエネルギー減衰の主因になるものと考えられる。したがって、図-12の結果は、周辺構造物の影響を考慮する場合における3次元数値シミュレーションの有用性を示しているものといえる。

護岸から0.4m位置に単体配置した矩形構造物と、複数配置の場合の護岸から0.4m位置に配置された矩形構造物について、最大津波波力の比較を図-13に示す。図-13にはシマモラら（2007）の論文に示された実験結果の読取値を併記しているが、計算と実験は良好に一致している。

図-12 複数配置時の最大津波波力
(実験結果：シマモラら（2007）)

図-13 複数配置の影響
(護岸から0.4m位置、実験結果：シマモラら（2007）)

また、両者の護岸からの位置は同一であるものの、単体配置の場合と複数配置の場合では津波波力が大きく異なり、後者の方が前者の1/2程度の波力となっている。計算でもこのような傾向が定量的に再現されており、周辺構造物の影響を考慮する場合における、3次元数値シミュレーションの有用性が確認された。

5. まとめ

本研究では、陸上構造物に作用する津波波力の評価について汎用コードを用いた3次元数値シミュレーションの適用性を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 朝倉ら（2000）の論文を参考として、3次元数値シミュレーションを行い、垂直壁に作用する遡上津波の波圧を評価した。その結果、最大波圧が直線分布となること、海底勾配の違いによって波圧の大きさが異なることが3次元数値シミュレーションでも定性的に再現されることを確認した。
- (2) シマモラら（2007）及び中村ら（2009）の論文を参考として、3次元数値シミュレーションを行い、矩形構造物に作用する津波波力を評価した。その結果、複数配置された矩形構造物の後列側における津波波力の低下について、計算結果と実験結果は良好に一致した。この結果から、津波波力に対する周辺構造物の影響を評価する際の、3次元数値シミュレーションの有用性を確認した。

朝倉ら（2000）やシマモラら（2007）の論文からも明らかなように、津波波力の評価には、津波の陸上への遡上過程と周辺構造物の影響を考慮することが重要となる。その観点からは、評価対象領域における地形や構造物の配置・形状を直接再現する大規模な3次元数値シミュレーションが有用なツールの一つになり得るものと考えられる。一方で、大規模な3次元数値シミュレーションの実現には、計算効率と精度を両立する計算格子の構成方法や、津波伝播解析からの境界条件生成等、開発すべき技術課題は多い。したがって、これらの取扱いが比較的容易である汎用コードの活用も、選択肢の一つになり得るものと考えている。

参考文献

- 中村友昭・水谷法美・藤間功司（2009）：遡上津波の変形と陸上構造物に作用する津波波力に関する3次元数値シミュレーション，第23回数値流体力学シンポジウム，G7-3。
- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森正憲（2000）：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，pp.911-915。
- チャルレス シマモラ・鴨原良典・藤間功司（2007）：建物群に作用する津波波力に関する水理実験，海岸工学論文集，第54巻，pp.831-835。