

沿岸構造物における津波数値解析技術の活用

Tsunami Simulation Methods for the Design of Coastal and Offshore Structures

大 森 拓 也 技術開発本部総合開発センター船舶海洋技術開発部 部長 博士（工学）
市 東 素 明 技術開発本部基盤技術研究所解析技術部 主査

東北地方太平洋沖地震で発生した津波は東北地方の太平洋沿岸に大きな被害をもたらし、沿岸部の津波対策の再考が強く求められている。沿岸構造物に対する津波対策に当たっては津波の数値解析の活用も重要なテーマである。本稿では、メガフロート（超大型浮体）の技術開発において当社が実施した「津波による外力評価法」を中心に津波の数値解析手法について解説する。数値解析手法としては、浅水波理論による推定法、差分法、界面捕獲法、また新しい解析手法として粒子法などを取り上げる。

The tsunami caused by off the Pacific coast of Tohoku Earthquake brought destruction to the Pacific coastline of Japan's northern islands. Consequently, tsunami countermeasures for coastal and offshore structures must be reconsidered. The use of numerical simulations takes an important part in the design of tsunami countermeasures. Several tsunami simulation methods are described; however, central to this paper is the IHI's "Tsunami External Force Evaluation," which was conducted as a part of development of the mega-float. The simulation methods mentioned are the shallow-water wave theory, finite-difference method, free-surface capturing method, and the newer moving particle semi-implicit (MPS) method.

1. 緒 言

東北地方太平洋沖地震で発生した津波は東北地方の太平洋沿岸に大きな被害をもたらし、沿岸部の津波対策の再考が強く求められる状況となった。津波は海岸近くにおいて急激に高くなり、非線形性を増すため、沿岸構造物に対する津波対策に当たっては津波の数値解析の活用が必要不可欠である。従来、沿岸構造物に対する津波の影響評価には、たとえば、危険物屋外タンクに対する消防庁による指針や原発サイトに対する公益社団法人土木学会指針などがまとめられている。しかし、基本的には水理実験に基づく津波波力推定式が用いられている。

津波の解析に当たっては、①震源からの発生と外洋での伝播②外洋から沿岸への伝播（浅水波）③沿岸での局所的変形と構造物への影響、の三つのフェーズを考慮する必要があり、各フェーズで現象の特性とスケールが大きく変化するため、一般的には階層的にシミュレーションし統合することが行われる。我が国の著名な津波統合解析システムとしては独立行政法人港湾空港技術研究所（PARI）のSTOCシステムがある。

本稿では、各フェーズについての推定手法の現況を概観するとともに、実際の推定例として、メガフロート技術研究組合が1996年度に実施した異常外力に関する研究で、

当社が担当して行った、津波による外力評価法の検討の結果を紹介する。

2. 津波のシミュレーション手法

2.1 震源での発生と外洋での伝播解析（フェーズ1）

津波の現象を推定するうえで、初期条件となる地震による地盤変動の推定は非常に重要である。一般的には断層モデルなどによって地盤の変位を推定し、その変位量が震源直上の水面変位として与えられることになる。また、震源域から外洋における津波の伝播は、水面にかく乱を与えたときに発生する平面波と同様に扱うことができるため、二次元的現象として簡易に解析が可能である。

近年ではコンピュータ能力の発達に伴い沿岸の地形影響を考慮した解析（フェーズ2）と統合される方向である。解析手法としては線形長波理論あるいは非線形長波理論が用いられており、東北大学津波工学研究室（DCRC）で開発されたTUNAMI（Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Near-field tsunamis）コード群が著名である⁽¹⁾。

2.2 外洋から沿岸への伝播解析（フェーズ2）

津波が沿岸部に到達すると、地形の影響を受けて波の変形が起こる。主な影響は二つあり、一つは水深が波長に比して浅くなるため波高が高くなること、もう一つは岬や湾

によって反射や回折などが発生し局所的に波高が変化することである。このため、沿岸部においては地形の影響を考慮できる推定法が必要である。近年では波の分散性や非線形性を考慮する非線形分散波理論の近似モデル（ブシネスクモデル）に基づく手法が発達し、砕波や遡上を取り入れることができるようになってきた。ブシネスクモデルに基づく著名な解析コードとしては PARI の NOWT-PARI が挙げられる⁽²⁾。

海洋の流れと波との共存状態を取り扱える数値流体力学的手法としては各種の手法が存在する。密度成層流を仮定して圧力は静水圧近似を用いるものが多いが、密度成層流と三次元 RANS CFD (Reynolds Averaged Navier-Stokes Computational Fluid Dynamics) 局所解析を組み合わせた推定法として、公益社団法人日本船舶海洋工学会によって開発された MEC モデル (Marine Environmental Committee Model)⁽³⁾がある。

2.3 沿岸構造物周辺の局所解析 (フェーズ 3)

沿岸構造物周辺では水深が極端に浅いため、津波波形は急峻になり砕波が起こることが多い。また陸地や河川への遡上、複雑な構造物周囲の流れなど三次元流れとして取り扱う必要がある。さらに構造物へ掛かる外力を推定するためには流体圧力的確な推定が必要になる。これらの理由から、局所解析では砕波を取り扱えるロバスタな自由表面条件を備えた三次元流体解析法 (CFD) が適している。このような解析法としては界面捕獲法としてカテゴリーされる VOF (Volume of Fluid) 法やレベルセット法が挙げられる。VOF 法を用いた津波解析コードとしては PARI の CADMAS SURF/3D⁽⁴⁾が著名である。

また近年、粒子法⁽⁵⁾と呼ばれる手法も開発されてきた。CFD 同様、Navier-Stokes 方程式に基づく手法であるが、格子を必要とせず、複雑な沿岸構造物や建物群の再現、浮体の漂流解析⁽⁶⁾などに有効であると考えられている。また、粒子法は近年盛んになってきた GPU (Graphics Processing Unit) への対応が容易であるという利点を活かした高速化が行われ注目されている。

3. シミュレーション事例

3.1 簡易推定法

以下に実際の推定例として、メガフロート技術研究組合の 1996 年度研究で、メガフロート (超大型浮体) に作用する異常外力評価の一環として当社担当で行われた、津波による外力評価法の検討⁽⁷⁾、⁽⁸⁾の結果を紹介する。

この検討では、外洋から沿岸への伝播 (フェーズ 2) に相当するものとして、浅水波理論に基づく簡便な理論推定式 (簡易推定法) および差分法による流場解析の 2 法について検討が行われた。

簡易推定法は湾口での津波の高さの変位を与え、線形理論の長波 (浅水波) の式に立脚して湾内における波動を計算する。津波が湾に進入すると固有振動 (セイシュ) が誘起されるが、これを支配的な流体運動と考える解析法である。湾内の水面変位は複数の周波数のセイシュの重ね合わせで表される。

推定計算結果から得られる情報は波高と流速・静水圧であるが、岸近くで砕波するような状況は取り扱えず、また流体運動による圧力も取り扱えないため、構造物に掛かる圧力を直接推定する必要があるような場合には不適である。

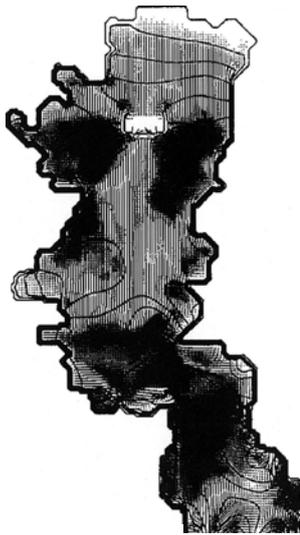
この方法は複雑な地形は考慮できないため、東京湾の形状を単純化した水深一定の矩形湾について検討例が示されているが、海底の摩擦係数を適切に設定する必要があることが指摘されている。

3.2 差分法

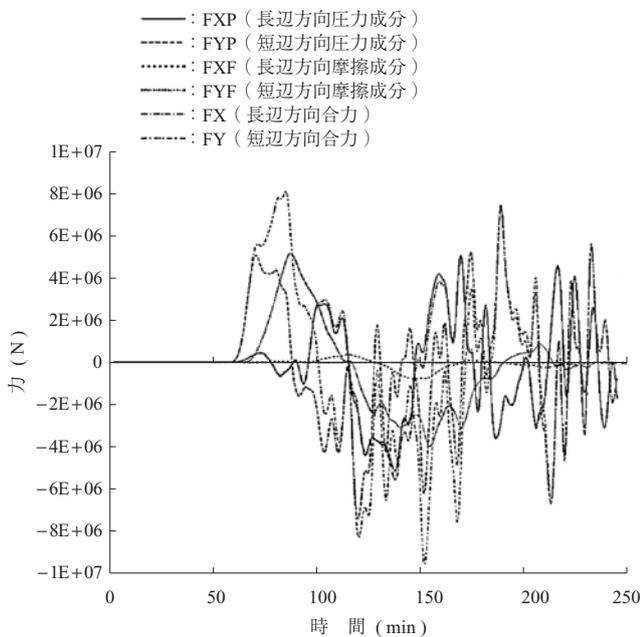
ここで使われた差分法の計算法⁽⁹⁾について述べる。支配方程式は、鉛直方向に静水圧近似を用いた Reynolds 方程式と連続の式である。水平面内の二次元運動方程式は時間項・移流項・拡散項・圧力項・コリオリ項で表され、鉛直方向の運動方程式は圧力項と重力の釣り合い式となる。渦動粘性係数は水平方向と鉛直方向で異なる値を与える。計算格子は矩形格子の集合体で詳細な地形を表現することができる。境界条件として水面の (風による) 摩擦応力と波形の連続条件、海底の摩擦係数を与える。格子に沿っていれば防波堤を境界条件によって近似的に取り扱うことも可能である。

推定計算結果から得られる情報は波高・流速・圧力である。波高については簡易法と同様に砕波を取り扱えない。流速・圧力は水平面内において精密なシミュレーションが可能であり局所的に流れ込む流量などを推定することはできるが、鉛直方向には静水圧近似のため、浮体に掛かる漂流力などの推定は可能であるが、波の打込みなどの動圧が問題となるような非線形性の強い動的問題には適さない。

この計算法を用いて、東京湾奥に長さ 5 km のメガフロートを配置した場合について日本近海の大地震を想定した津波 (湾口で周期 16 分、波高 2.5 m) のシミュレーションを行い、波高・流速分布 (第 1 図) や浮体に掛かる力 (第 2 図) を推定している。



第1図 波高の等高線および流速ベクトル図⁽⁸⁾
 Fig.1 Wave height contour and flow velocity map



第2図 浮体に働く流体力の時間変化⁽⁸⁾
 Fig.2 Time variation of hydrodynamic forces on floating objects

4. 結 言

本稿では津波のシミュレーション手法について概観し、メガフロートの研究開発当時に行われた推定計算手法について紹介した。

メガフロートの検討で使われた差分法は詳細な結果が得られ、沿岸構造物への波入力推定に効果的と考えられる。しかし、沿岸構造物に砕波した津波が打ち込むような非線形性の強い問題には適さず、そのような問題には強非線形

の三次元解法、たとえばVOF法などが適していると考えられる。また、東日本大震災で多数みられた船舶やタンクなどの漂流の解析には粒子法などの新しい解析手法の発展が望まれる。

— 謝 辞 —

メガフロート研究時、ご討論いただきましたメガフロート技術研究組合(当時)関係各位に、ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) F. Imamura, Ahmet Cevdet Yalciner and Gulizar Ozyurt: TSUNAMI MODELLING MANUAL (TUNAMI model) 2006年4月 オンライン(入手先) <<http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/projects/manual-ver-3.1.pdf>> (参照2011-06-27)
- (2) 平山克也: プシネスクモデル(NOWT-PARI)を用いた高精度港内静穏度解析法の提案 港湾空港技術研究所資料 No.1159 2007年6月
- (3) 佐藤 徹: MECモデルを用いた海洋環境に関するシミュレーション: full-3Dモデルと静水圧近似モデルの結合(シンポジウム: 沿岸域の数値モデリング-海洋関連各分野での取り組み) 沿岸海洋研究第47巻2号 2010年2月 pp.93 - 100
- (4) 磯部ほか: 沿岸技術ライブラリー No.39 CADMAS - SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発 財団法人沿岸技術研究センター 2010年12月
- (5) 越塚誠一: 粒子法 丸善 2005年2月
- (6) 後藤ほか: 粒子法によるエプロン上のコンテナ漂流挙動追跡のシミュレーション 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. B2-65 No.1 2009年 pp.261 - 265
- (7) メガフロート技術研究組合: 平成8年度超大型浮体式海洋構造物の試験研究「異常外力算定プログラム作成」1997年3月
- (8) メガフロート技術研究組合: 平成8年度超大型浮体式海洋構造物の試験研究「異常外力の算定」1997年3月
- (9) 多部田茂, 藤野正隆: 多層モデルによる高潮の数値シミュレーション 日本造船学会論文集 第173号 1993年 pp.175 - 184