

沿岸構造物に対する津波評価技術の構築

Numerical Simulations and Experiments on Tsunami for the Design of Coastal and Offshore Structures

市 東 素 明	技術開発本部基盤技術研究所解析技術部 主査
犬 塚 一 徹	技術開発本部基盤技術研究所解析技術部 博士(工学)
天 谷 一 朗	ジャパンマリユニテッド株式会社 技術研究所流体研究グループ 博士(工学)
齊 藤 宏 幸	技術開発本部総合開発センター機械技術開発部
倉 田 隼 次	技術開発本部基盤技術研究所解析技術部

2011年東北地方太平洋沖地震での甚大な被害を契機として、あらためて津波に対する評価技術への要求が高まっている。そこで求められる評価技術は非常に広範なものであるが、本稿では、津波の伝播、波力、漂流などに対する数値解析技術および長周期津波水理実験技術を構築した結果を示す。また、これらの評価技術の適用事例として、沿岸タンクへの津波波力評価や湾口防波堤の津波低減効果などについて紹介する。

Extensive damage caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake triggered demands for a variety of tsunami assessment methods. These are described in this paper, including numerical simulations of tsunami propagation, wave impact load and drifting, and hydraulic experiment techniques to generate the long wavelengths that are characteristic of tsunami. The simulations and experiments were carried out on run-up tsunami acting on the tank and the barrier effects of tsunami breakwaters located in the bay mouth.

1. 緒 言

2011年東北地方太平洋沖地震の広域にわたる津波被害を契機として、数値解析および水理実験の両面から沿岸構造物に対する津波評価技術の必要性が高まっている。これらは多岐にわたるため、総合的な評価技術の構築が求められている。

津波の数値解析としては、①波源から沿岸までの数百 km オーダの広域伝播解析(二次元・静水圧近似)②数 km オーダ以下の沿岸構造物に対する波力解析(三次元・非静水圧近似)③津波による漂流解析、などが挙げられる。また水理実験技術としては、①ゲート急開法による津波先端(段波)波力試験②ポンプ式造波法⁽¹⁾による長周期津波試験③曳航試験法による定常津波波力試験、などがある。

本稿では、数値解析事例として、非線形長波理論に基づく二次元広域伝播解析、VOF (Volume Of Fluid) 法に基づく三次元波力解析、粒子法に基づく漂流解析について、また水理実験法としてポンプ式長周期津波試験について述べる。適用事例としては、港湾内の最大波高、陸上タンクに対する波力、湾口防波堤の波高抑制効果などについて紹介する。

2. 数値解析手法

2.1 津波二次元広域伝播解析

二次元広域伝播解析は、非線形長波理論に基づき、津波波高の伝播を扱うものである。初期条件は断層モデルを用いた水位変化を用いることが多い。伝播解析では圧力は直接解かず、静水圧近似を用いる。従来、物体に働く波力は、構造物周囲の波高から水理実験に基づく最大波力推定式(合田式、朝倉式、広井式など)を用いて推定することが多かった。しかし、後述の三次元波力解析と組み合わせることでより直接的な評価が可能になる。

本研究では数値解析コードとして、東北大学津波工学研究室で開発された TUNAMI (Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation) コード⁽²⁾を用いた。

2.2 津波三次元波力解析

三次元波力解析は、支配方程式を非圧縮 Navier-Stokes 方程式とし、二相流れを VOF 法などによって扱う手法である。圧力は Poisson 方程式の反復計算によって直接求められる。自由表面の界面追跡法にはドナー・アクセプタ法や形状再構成法などが用いられる。本研究ではドナー・アクセプタ法を用いた。計算負荷の高さから、波源から全領域を解くことは困難であるため、境界条件として、津波

の入射境界に波高伝播解析で得られた波高の時間履歴を用いることが多い。

本研究では数値解析コードとして、独立行政法人港湾空港技術研究所で開発された CADMAS Surf/3D⁽³⁾ を用いた。

2.3 津波漂流解析

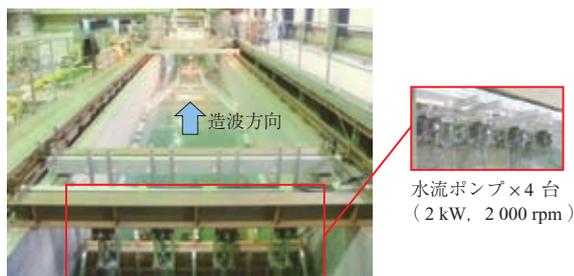
2011 年東北地方太平洋沖地震の津波被害の特徴の一つとして、港湾コンテナ貨物をはじめとする漂流物によるものが多くみられたと言われている⁽⁴⁾。こうした物体の移動を伴う流体解析手法としては、流体解析から得られた流体力を外力として運動方程式を解く手法が多く用いられている。しかし、近年では粒子法（MPS 法、SPH 法など）を用いて、津波による流れと物体運動とを連成して同時に解くことも行われるようになってきた。

本研究では数値解析コードとして、汎用の粒子法解析コード Particleworks V3.01（プロメテック・ソフトウェア株式会社）を用いた。本コードは MPS 法⁽⁵⁾、⁽⁶⁾に基づくものである。

3. 水理実験手法

3.1 ポンプ式長周期津波造波法

1/100 スケール模型実験を考えると、時間スケールは 1/10 となる。たとえば実スケール 15 min (900 s) の津波周期と 7.5 m の津波波高を模擬するためには、周期 90 s と波高 75 mm を両立させる必要がある。一般に水理実験用の造波装置としてプランジャ式やピストン式の造波機が用いられることが多いが、長周期かつ大波高の津波を模擬することは困難である。本研究では、大流量のポンプを用いた長周期津波造波法を開発した。水路には当社の水理実験場（横浜事業所）（幅：2.5 m、長さ：44.0 m、深さ：1.5 m）を用い、水流ポンプ（2 kW × 4 台）のインバータ制御によって造波を行う。ポンプ式造波装置の外観を第 1 図に示す。本装置によって周期 90 s、波高 75 mm の造



第 1 図 ポンプ式津波造波装置
Fig. 1 Wave generator driven by pumps

波を行うことが可能である。

3.2 曳航実験法

ゲート急開法やポンプ式造波法が過渡における津波波力を想定しているのに対し、曳航実験法は定常波力の実験に適している。曳航実験では静止水路中を曳航台車によって対象物を曳航移動させ、ロードセルで波力を測定する。ここでは曳航速度が津波の流速に相当する。当社の水理実験場では最大曳航速度 2 m/s までの橋梁などの曳航実験が可能である。たとえば 1/50 スケール模型試験（速度スケール $1/\sqrt{50}$ ）を考えると、この最大曳航速度 2 m/s は実機スケール流速で約 10 m/s に相当するが、一般的な陸上での Froude 数 $Fr = 1.5$ 以上を実現するためには、試験水深 0.18 m（実スケール 9 m）以下が必要になり、実験模型サイズもそれが上限になる。

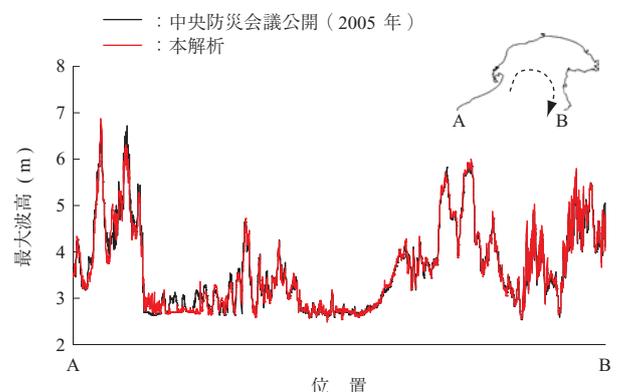
4. 適用事例

4.1 広域伝播解析

中央防災会議 東南海、南海地震等に関する専門調査会（第 16 回）（2003 年 12 月 16 日）について、東海・東南海・南海 3 連動地震のケースで伝播解析を行った。駿河湾での最大波高を公開データと比較結果を第 2 図に示す。解析結果は公開データと良い一致を示した。また港湾内（S 港）の解析事例として最大波高、最大波高到達時間、第一波到達時間分布を第 3 図に示す。

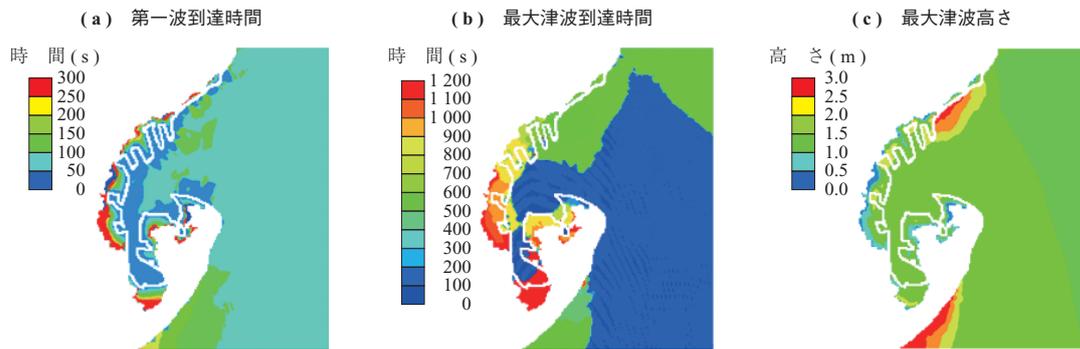
4.2 波力解析

陸上タンクに作用する津波波力について、文献⁽⁷⁾による実験値と比較した。解析対象の模式図を第 4 図に、波力および波圧分布を第 5 図に示す。波力、波圧ともに文献値と良い一致を示している。

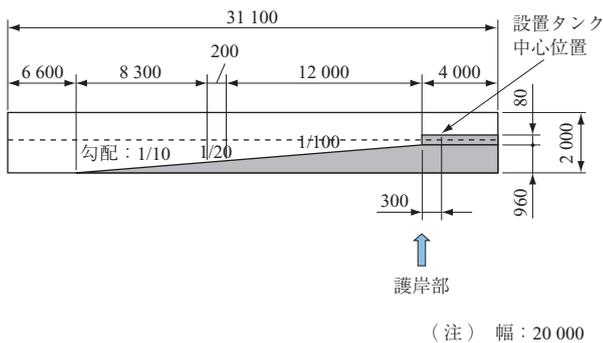


（注）---▶：グラフの横軸の方向（海岸線に沿って一筆書き）を示す。

第 2 図 最大波高の比較（東海・東南海・南海 3 連動地震）
Fig. 2 Comparison of maximum wave heights (Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes)



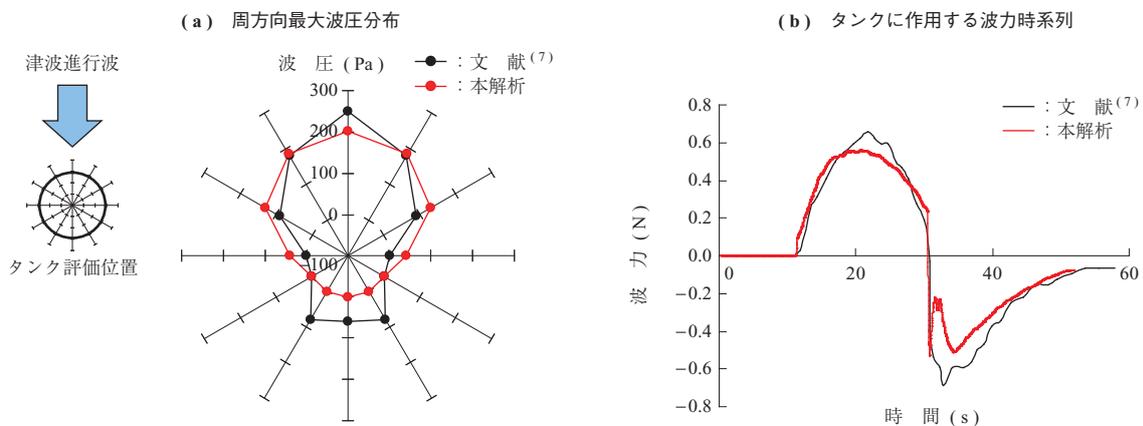
第 3 図 港湾内の津波伝播解析 (東海・東南海・南海地震)
 Fig. 3 Contours of tsunami wave propagation in harbors (Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes)



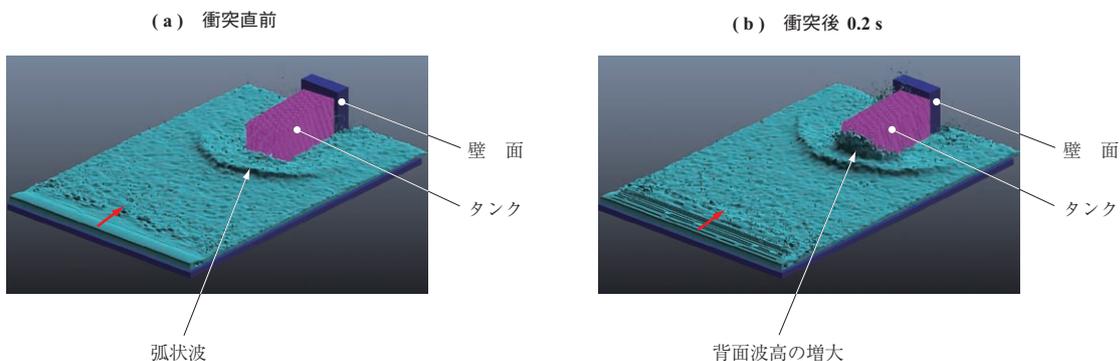
第 4 図 陸上タンク津波波力実験模式図 (単位: mm)
 Fig. 4 Schematic of the experimental set up for run-up tsunami pressure load acting on the tank (unit: mm)

4.3 漂流解析

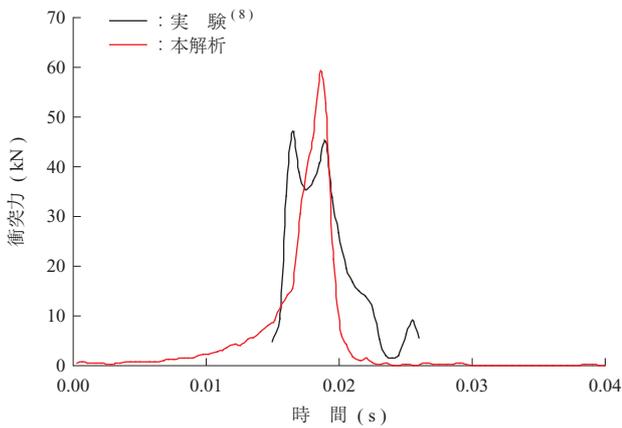
津波によって漂流するコンテナとコンクリート壁の衝突について、文献⁽⁸⁾による実験値と比較した。漂流コンテナの壁面衝突前後の波面を第 6 図に、衝突力の時間履歴を第 7 図に示す。弧状の波面形状は定性的に実験と一致した。衝突力は定量的には若干のずれがみられるものの、定性的な傾向については捉えている。ただし衝突問題は、実験においても片当たりの発生や床面の摩擦力などのわずかな差異によって、計測結果に大きなばらつきが出るため、数値解析との比較方法には課題がある。



第 5 図 タンクに作用する津波波圧
 Fig. 5 Comparison of tsunami forces acting on the tank



第 6 図 漂流コンテナの壁面衝突前後の波面
 Fig. 6 Free surfaces before and after the collision of the washed-away container with the vertical wall



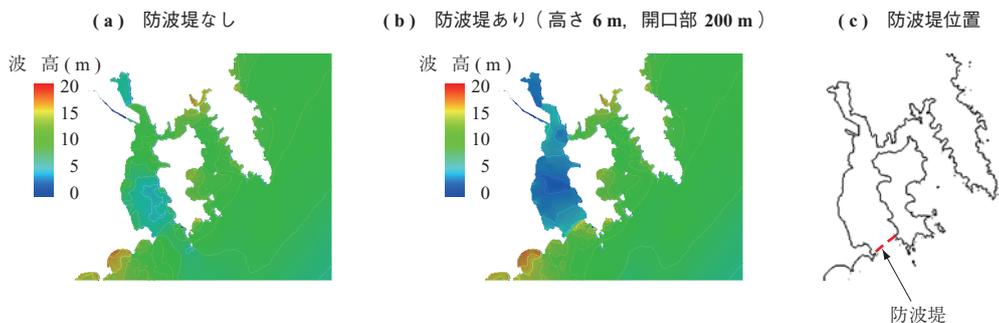
第 7 図 衝突力の時間履歴
 Fig. 7 Time history of the impact force between the washed-away container and the wall

4.4 浸水域評価（東日本大震災）

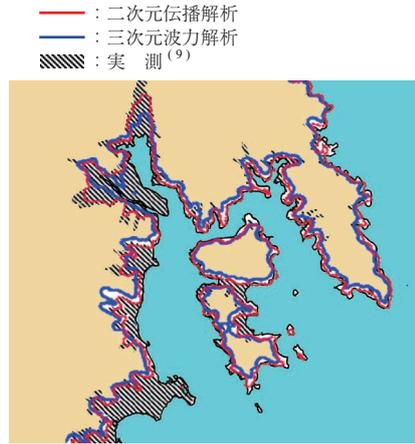
2011 年東北地方太平洋沖地震を対象に、沖合に設置された GPS (Global Positioning System) 波浪計の津波波形を入射条件として陸上への浸水範囲を二次元伝播解析コードおよび三次元波力解析コードでそれぞれ解析し、現地踏破による実測⁽⁹⁾と比較した。浸水範囲の比較結果を第 8 図に示す。対象地形は宮城県 K 湾である。いずれの解析結果も実測と良く一致している。

4.5 湾口防波堤

4.4 節と同一地形に対し湾口防波堤による湾内の津波波高低減効果を調査した。防波堤の設置位置での水深は 10 m 以下であり、ほかの湾口防波堤と比較して設置コストは低いと考えられる。波源はレベル I 津波（100 年に一度）として明治三陸型、レベル II 津波（最大レベル）として 2011 年東北地方太平洋沖地震を用いた。レベル II 津波（2011 年東北地方太平洋沖地震）の場合の最大波高分布を第 9 図に示す。湾内波高は、レベル I 津波の場合で 1.4 m、レベル II 津波の場合で 6.0 m 程度低減することができており、有効な効果が得られることが確認できた。



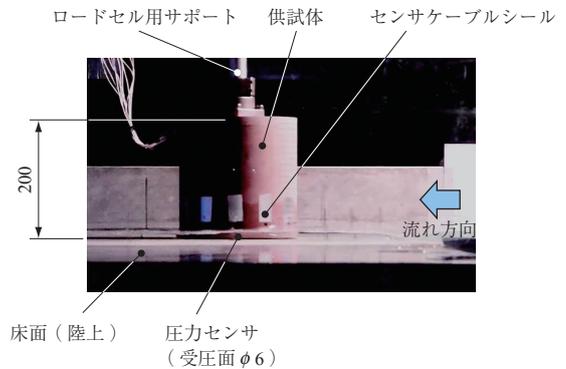
第 9 図 最大波高分布
 Fig. 9 Contours of the maximum wave height



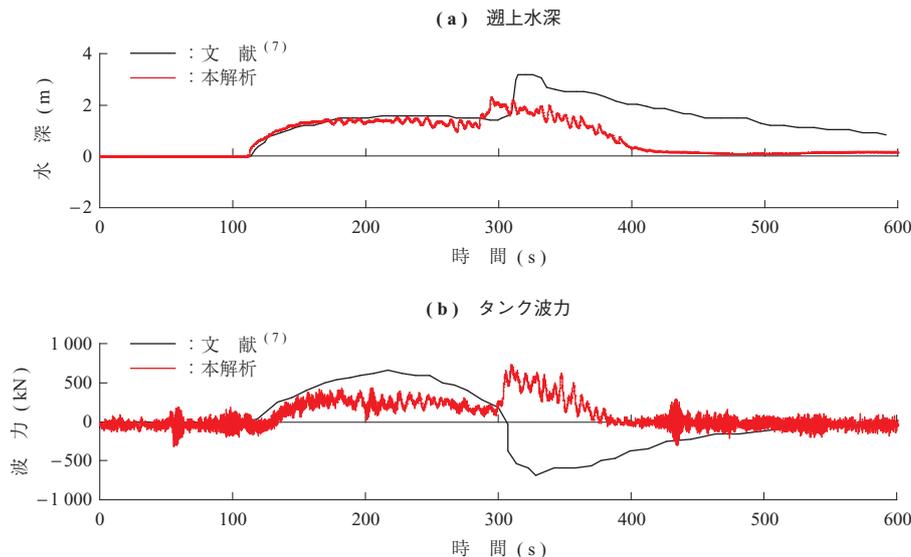
第 8 図 浸水範囲の比較
 Fig. 8 Comparison of flooded areas among the two simulation types and the field survey

4.6 タンク津波水理実験

4.2 節で用いた陸上タンクに作用する津波波力をポンプ式造波装置を用いて再現した。実験でのタンク周りの波面の一例を第 10 図に、遡上水深とタンクに対する津波波力の時間履歴の文献⁽⁷⁾との比較例を第 11 図に示す。本実験では反射波を考慮していないため、反射波の到達時間 300 s 以降では一致しないが、進行波の部分では文献と良い一致を示している。



第 10 図 陸上タンク津波波力実験（単位：mm）
 Fig. 10 Experimental set up for run-up tsunami force acting on the tank (unit : mm)



第 11 図 遡上水深およびタンク波力の時間履歴

Fig. 11 Time histories of the run-up water height and the pressure load acting on the tank due to the run-up tsunami

5. 結 言

津波評価のための数値解析および水理実験技術について、主に湾口防波堤と陸上タンクの事例を示した。伝播、波力、漂流といった津波に関わる現象はそれぞれ密接に関連しており、今後は連成技術などのより融合した発展が望まれる。また橋梁などの複雑な構造物に作用する波力（揚力、抗力）とその発現メカニズムについては、まだ明確になっていない点も多い。これらについては、津波波力のそれぞれの側面（段波、長周期性など）について、より詳細な水理実験による解明が必要と考えられる。

— 謝 辞 —

本研究の津波数値解析に当たっては、独立行政法人港湾空港技術研究所の富田孝史氏、有川太郎氏から多大なご指導とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 岩瀬浩二, 朝倉良介, 池谷 毅, 金戸俊道, 藤井直樹, 川口 隆: ポンプ式津波造波装置の開発 土木学会第 56 回年次学術講演会 2001 年 10 月 pp. 564 - 565
- (2) F. Imamura, Ahmet Cevdet Yalciner and Gulizar Ozyurt : TSUNAMI MODELLING MANUAL (TUNAMI model) オンライン (入手先) < <http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokudai3/J/projects/manual-ver-3.1.pdf> > (参照 2011-07-15)

- (3) 財団法人沿岸技術研究センター: CADMAS SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究中間報告書 沿岸技術ライブラリー No. 39 2010 年 12 月
- (4) 宮城県総務部消防課産業保安班: 東日本大震災における高圧ガス施設被害状況調査の結果について 2011 年 9 月 オンライン (入手先) < <http://www.pref.miyagi.jp/syoubou/SANPOHAN/TOPPAGE/taiheiyookijishin/jishinjoho/higaichosakokai.pdf> > (参照 2012-01-15)
- (5) S. Koshizuka and Y. Oka : Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid Nuclear Science and Engineering Vol. 123 (1996) pp. 421 - 434
- (6) 越塚誠一: 粒子法 丸善株式会社 2005 年 2 月 pp. 21 - 35
- (7) 池谷 毅, 秋山真吾, 藤井直樹, 大森政則: 石油タンクに作用する津波波力の評価と被害予測手法 地域安全学会論文集 (7) 2005 年 11 月 pp. 307 - 314
- (8) 有川太郎, 大坪大輔, 中野史文, 下迫健一郎, 石川信隆: 遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験 海岸工学論文集 第 54 巻 2007 年 10 月 pp. 846 - 850
- (9) 日本地質学会: 東日本大震災津波現地踏査報告 2011 年 オンライン (入手先) < <http://www.jsjg-map.org/tsunami/> > (参照 2011-09-01)