津波が構造物を越流する場合の 3次元流動特性に関する研究

石本 健治¹・北川 翔太²・松村 沙季³・井崎 丈⁴・浅野 敏之⁵

¹ 正会員 (株)エコー 技術本部構造設計部 (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)
E-mail: ishimoto@ecoh.co.jp

² 佐賀県庁 (〒840-8570 佐賀市城内 1 丁目 1-59)

³ 三洋コンサルタント 九州支店設計部 (〒800-0031 北九州市門司区高田 1-3-1)
E-mail: matsumura-saki@sanyo-cnsl.co.jp

⁴ 正会員 鹿児島大学技術職員 理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)
E-mail: izaki@eng.kagoshima-u.ac.jp

⁵ 正会員 鹿児島大学教授 理工学研究科海洋土木工学専攻(〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)
E-mail: asano@oce.kagoshima-u.ac.jp

東日本大震災では、構造物を津波が越流する記録が多く残されており、その様相は3次元的事象であるということがわかった。構造物周りの津波流動の精密な評価を行うためには3次元の流れに対する評価手法の開発が必要である。これに対する数値解析手法としては、CADMAS-SURF/3D などがあるが、実務に適用するためには、実現象との再現性を確認しておく必要があり、3次元の水理実験結果との詳細な比較を行うことが必要である。本研究は、平面実験水槽に津波造波装置を設置し、構造物に衝突し越流する孤立波流動の水理模型実験を行うとともに、実験と同等の構造物・波浪条件でCADMAS-SURF/3D による解析を実施した。両者の比較検討から、防波構造物周辺の3次元流動特性を明らかにするとともに、数値解析手法の適用性を検討したものである。

Key Words : *tsunami overflow , numerical analysis , three-dimensional flow , physical model , CADMAS-SURF/3D*

1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災の津波の画像・映像記録から認められるように、建物群や防波構造物がある場合に津波が作用して越流した際の様相は、きわめて3次元的事象であり、津波の進行方向や流速の変化、浸水域の精密な評価を行うには、3次元の流れに対する評価手法の研究が必要である。

現在、上記の要請に応えると期待される解析手法の一つとしてVOF法をベースとしたCADMAS-SURF/3Dが提案されている¹⁾。近藤ら²⁾は、防波堤堤頭部周辺の流れとマウンド被覆ブロックの被災状況に関する平面水槽実験の結果に対して、この3次元数値モデルの適用性を検討している。また大家・有川³⁾は、防波堤背後の建屋に作用する津波力に関する平面水槽実験の結果を用いて、数値モデルの再現性を検討している。一方で、近年OpenFOAMを使った橋梁などの構造物まわりの3次元津波流動解析が開発されているが⁴⁾、これについても水理実験結果との比較検討により数値解析手法の適用性の

検討が報告されている⁵⁾⁶⁾。

こうした研究における実験結果の再現性は課題によってまちまちであり、3次元数値解析モデルの適用性を一律に評価することはできないと考える。すなわち、数値解析の実験結果を再現する能力は、対象とする物理量(流速か波力か、波力は全波力か局所的波力か)や、流れの複雑さ・変動の激しさ(津波の構造物との衝突状況、碎波、越波など)によって異なると判断される。したがって、現時点ではさまざまな3次元流れの状況に対して実現象との詳細な比較・検討結果を蓄積していくことが、有用な3次元数値解析モデルを確立する上で重要と考えられる。

本研究は、鹿児島大学の平面実験水槽内に新規に導入された津波造波装置を用いて、構造物周辺の3次元流動の計測を目的とした水理模型実験を行うとともに、実験と同じ構造物・波浪条件で3次元流動数値モデルとしてCADMAS-SURF/3Dによる解析を実施し、両者の比較検討から、防波構造物周辺の3次元流動特性の特性を検討したものである。

図-1 実験水槽の概要図

図-2 実験装置と水位測定点の配置図

2. 3次元流動特性に関する水理模型実験

(1) 水理模型実験の概要

a) 実験・計測装置

水理模型実験は、図-1に示す、長さ26m、幅13m、最大水深1.2mの平面実験水槽、プランジャー型造波装置と、容量線式波高計、データロガーを使用した。実験水槽内に、長さ2m、幅3mのコンクリート平坦床を造成し、その上に幅800mm、断面70mm×70mmの角柱を防波構造物モデルとして設置した(図-2)。造波方法は船底型断面のプランジャーを600mmのストロークで3.3s間に水中に押込むことで孤立波を発生させた。

図-3 波高計アレイ

これらの装置は、実スケールの構造物と地形をフルード数相似則により縮尺1/50で模型化したものであり、防波構造物の中心軸を原点として沖向きを正としてx軸を取り、y軸を防波構造物長さ方向(沿岸方向)に取った。なお、数値解析結果との比較検討を行うため、図-2中のx軸とy軸の値は実スケールに換算した値として示しており、以降の水位などの実験結果についても、実スケールに換算して説明する。

b) 実験方法

実験において計測した測定点は、図-2に示すようにx方向、y方向に模型寸法で100mm(実スケールで5m)ずつ離れた格子状の105点である。図-3は波高計7台をライン上に間隔100mmで並べた波高計アレイであり、波高計の最下端は床面から30mmの高さに設置した。ただし、防波構造物模型のx=0m、y=5m~20m(実スケール表示)では波高計最下端を床面から90mmの高さ(防波構造物天端から20mmの高さ)に設置した。

図-2に示した105点に対する波の3次元的水位変動を測得するため、波高計アレイをずらしながら、同じ造波条件で複数回の測定を行い、沖の波高計の水位変動を基準として同時記録となるよう整理した。

(2) 水理模型実験の結果

a) 実験結果の概要

写真-1は、造波装置によって発生した波が、防波構造

写真-1 防波構造物での波の越流状況

物に衝突した瞬間を示している。防波構造物の位置では打ち上がった波によって、構造物が見えなくなるくらい大きく越流しており、構造物が無い右側の部分と大きな水位差が生じていることがわかる。波の打ち上がりはビデオ画像では瞬間的に防波堤模型の高さの3倍程度(実スケールで10.5m)に達している。ただし、後述の図-4の波高計で記録されたピーク水位は最大でもたかだか7m程度である。波高計は2本の容量線の間の水柱による電気容量の変化を測定しており、映像から読み取れる空気を巻き込んだ水塊の跳ね上がる高さを測定していないことも考えられる。また急激な現象に対する計測器の応答性も今後検討の必要がある。

b) 水位変動の3次元特性

図-4は、防波構造物の沖側 $x=10\text{m}$ 、直上 $x=0\text{m}$ および岸側 $x=-10\text{m}$ において、沿岸距離 y をパラメータとしたときの水位の時刻歴を示したものである。

沖側の $x=10\text{m}$ の結果において、 $t=48\text{s}$ 付近までは $y=5\text{m} \sim 35\text{m}$ で測定された水位がほぼ同じ波形で上昇しており、この期間が防波構造物の反射の影響を受けていない入射波の状態と考えられる。 $t=54\text{s}$ 付近で水位が増大しているのは、入射した波が防波構造物によって反射したものである。この水位の上昇は防波構造物が設置された $y=5 \sim 15\text{m}$ で大きいのは当然であるが、構造物のない y 方向領域である $y>25\text{m}$ でも反射波の存在が認められる。この反射波のピーク値は y とともに小さくなり、第1波と反射波のピークの時間的間隔も広がることがわかる。

防波構造物直上の $x=0\text{m}$ の結果では、構造物のある $y=5\text{m} \sim 15\text{m}$ で水位が鉛直に立ち上がっているが、 $y=25\text{m} \sim 35\text{m}$ の構造物のない開口部では水位のピークが遅れて発生していることがわかる。これは構造物によって進行を止められた波が開口部に回り込んでくるためと考えられる。

防波構造物より岸側の $x=-10\text{m}$ の結果では、 $x=0\text{m}$ の結果に比べて、水位の大きさとピーク時間の y による差が小さくなっていることがわかる。この領域では、防波構造物が無い開口部から回折して岸側に進行した波と、防波構造物を直接越流した波が重なる場であり、水位変動の y による差が減少すると考えられる。ただし、水位のピークは図中赤丸で示したように y が大きくなる(防波構造物から離れる)ほど右にずれているが、開口部からの入射波と構造物から離れる方向に広がる越流波との重なる時刻が y とともに遅れるためである。

図-5は、構造物のある $y=15\text{m}$ の位置において、岸沖方向位置 x をパラメータとした場合の水位の時刻歴を示したものである。上図は防波構造物より沖側の水位変動波形で、 x の大きい沖方から波が領域内に入ってきて、 $x=0$ で構造物に衝突して急激なピークを持ち、その反射波が x の大きい沖方に伝わっていく様子がわかる。下段は構

図-4 沿岸方向位置をパラメータとした水位の時刻歴
(上図 $x=10\text{m}$ 、中央 $x=0\text{m}$ 、下図 $x=-10\text{m}$)

図-5 岸沖方向位置をパラメータとした水位の時刻歴
(上図 $x>0\text{m}$; 沖方、下図 $x<0\text{m}$; 岸方)

図-6 数値解析モデル領域図

造物より岸側の水位時系列で、構造物を越流後、前方に水塊が落ち込み、 x が岸側に向かうとともに強い乱れと渦によって水位変動波形の擾乱が著しくなることがわかる。

3. 3次元流動の数値計算

(1) 3次元数値解析モデルの概要

CADMAS-SURF/3D モデルによる 3 次元流動の数値解析は、水路幅を除き水理模型実験と同じ断面地形、防波構造物形状の条件下で実施した。図-6 に CADMAS-SURF/3D の解析モデル全体図を、表-1 に解析条件を示す。

数値解析における造波については、実験で発生させた孤立波を再現するものとし、林⁷⁾による孤立波理論に基づいた水位マトリックスデータ（孤立波の水位と流速の時系列データ）を用いて、防波構造物の周辺での水位が実験水位と概ね合うように設定した。境界条件は、造波側では Sommerfeld の放射境界、エネルギー減衰帯を組み合わせた無反射造波とし、領域右端は十分な容量の排水溝による無反射境界とした。

計算条件としては、格子サイズを $\Delta x=0.5\text{m}$, $\Delta y=0.5\text{m}$, $\Delta z=0.25\text{m}$ とし、時間刻みを CFL 条件を満たす $\Delta t=0.01\text{s}$ とした。造波関数は使用せず、造波ソース幅を水路幅と等しい 50m 、側方条件を放射境界条件、底面・側壁境界条件を SLIP、減衰帯幅を 50m （水路幅）とし減衰帯長さを 150m に設定した。全体の計算領域の寸法は $x=430\text{m}$, $y=50\text{m}$, $z=20\text{m}$ とした。なお、解析時の水位は実験時の水位と同様とし、図-6 に示すように防波構造物の下端の平坦面と同じ高さとした。

(2) 数值解析結果

図-7 は、造波ソースから発生した波が、防波構造物に当たった時のスナップショットであり、実験での写真-1と同様に、防波構造物の位置では打ち上がった波によつ

表-1 CADMAS-SURF/3D の解析条件

解析条件	
格子サイズ	$\Delta x=0.5\text{m}$ $\Delta y=0.5\text{m}$ $\Delta z=0.25\text{m}$
時間間隔	$\Delta t=0.01\text{s}$ 以下
計算領域長	$x=430\text{m}$ $y=50\text{m}$ $z=20\text{m}$
造波ソース幅	50m(水路幅)
開境界条件	微小振幅波による放射境界
底面・側壁境界条件	SLIP

て構造物が、見えなくなるくらい大きく越流していることがわかる。

また、図-8は、図-7の時刻での防波構造物付近($x=0m$)と防波構造物の背後($x=-20m$)の沿岸方向の水位変化を示したものであり、防波構造物付近での波が打ち上がった水位と同時刻の開口部の水位差、防波構造物の端部周

図-7 防波構造物への波作用のスナップショット
(岸～沖方向)

辺の水位変化の表現ができていたことがわかる。また、防波構造物側の背後においても時間が経つにつれて、水位が y 方向に一樣となることも表現できている。

4. 3次元流動場における水理模型実験と数値解析結果との比較検討

図-9は、水理模型実験と CADMAS-SURF/3D（数値解析）の任意時刻における沿岸方向の水位変化を比較したものであり、赤線が水理模型実験、青線が数値解析の結果である。図-9の上図は防波構造物より沖側の水位変化を示しており、入射条件は同等であることがわかる。図-9の中図は、防波構造物付近（ $x=0m$ ）の水位変化を示しており、防波構造物による打ち上げ高については差が生じているが、防波構造物の無い $y=20m\sim 35m$ についての水位の値と変化の状況は概ね一致していると言える。図-9の下図は、防波構造物より岸側（ $x=-20m$ ）での水位変化であり、上図の結果と同様に、防波構造物の背後である $y=0m\sim 20m$ の水位には差が生じているが、 $y=20m\sim 35m$ の水位変化の傾向は同様な結果となっている。なお、 $y=5m$ 付近は、水理模型実験では防波構造物の中心からの折り返し位置であるが、数値解析では側面境界に近いため、差が生じていると考えられる。

以上の結果、数値解析での防波構造物での打ち上げや越流現象の解析において、空気・水比を示すVOF関数のパッキングの取扱い等について再現性の課題があるものの、数値解析によって防波構造物周辺での3次元的な水位変化の特性が把握できることを確認できた。

5. まとめ

構造物を越流する津波の3次元流動について、水理実験結果と CADMAS-SURF/3Dによる数値解析結果とを比較検討したところ、以下のことがわかった。

- (1) 沿岸方向の一部区間に防波構造物を設置した平面水理模型実験の結果から、構造物沖側では反射波が開口部区間にも伝搬すること、構造物直上では構造物で進行を止められた波が開口部側に回り込んで沿岸方向の水位変化が生じること、構造物岸側では越流波と開口部からの進入波が重なるため、水位ピークの発生時刻の差が減少し沿岸方向の水位勾配が緩やかになる、などの3次元特性が明らかになった。
- (2) CADMAS-SURF/3D モデルによって水理模型実験の再現性を検討したところ、細部で再現精度の不足も認められたが、同時刻の沿岸方向の水位変化等について、実験結果と同じ特性を持つ結果を得ることができた。

図-8 各時刻での沿岸方向の水位分布

図-9 同時刻での水理模型実験と数値解析の水位比較
(上図 沖側平坦床端部、中図 防波構造物位置、下図 構造物背後)

- (3) 3次元流動場の数値解析モデルは、水理模型実験を適宜援用することで適切な現象解明が可能と考えられ、今後、防波構造物の設計や防護施設の配置検討に有効なツールとなると考えられる。

本実験が対象とした、津波が防波構造物の模型に衝突し越流する流れは、きわめて短時間に薄い水壁が立ち上がる気液混相流であった。したがって容量線式波高計が果たしてこの急激な水位変化を測得できているかどうか、高速カメラ画像解析等を併用し検討する必要がある。また CADMAS-SURF/3D モデルによるこうした急峻な気液混相現象の再現性についても、さらに詳細に検討する必要がある。高く打ち上げられた気液混相流体塊は、液体単相にパッキングされ低く換算された水塊より、状況によっては大きな災害外力となることも考えられ、引き続き研究を進める必要がある。

参考文献

- 1) 沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発，沿岸技術ライブラリーNo.39, 235p, 2010.
- 2) 近藤圭央・有川太郎・関克己・村川はるみ：3次元数値波動水路を用いた防波堤堤頭部の被覆材移動による被災の検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.65, No.1, pp.861-865, 2009.
- 3) 大家隆行・有川太郎：CADMAS-SURF/3D を用いた防波堤背後の建屋に作用する津波力の検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.70, No.2, pp.801-805, 2014.
- 4) 野中哲也・本橋英樹・原田隆典・坂本佳子・菅付紘一・宇佐美勉：津波波源から橋梁までの全体系津波再現解析，第15回性能に基づく橋梁などの耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.25-32, 2012.
- 5) 川崎浩司・松浦翔・坂谷太基：3次元数値流体力学ツール OpenFOAM における自由表面解析手法の妥当性に関する検討，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.69, No.2, pp.748-753, 2013.
- 6) Higuera, P., L.L.Javier and I. J. Losada: Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM, Coastal Engineering, Vol.71, pp.119-134, 2013.
- 7) 林泰造：孤立波，海岸工学研究発表会論文集，第1巻，pp.27-33, 1954.

STUDY ON THREE-DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF TSUNAMI FLOWS OVER A STRUCTURE

Kenji ISHIMOTO, Shota KITAGAWA, Saki MATSUMURA,
Takeshi IZAKI and Toshiyuki ASANO

Various visual and observatory tsunami records taken at the East Japan Great Earthquake Disaster have revealed that the behavior of tsunami overtopping are highly three dimensional. For the precise evaluation of the tsunami motions, the development of computational techniques for the three dimensional flows is necessary. CADMAS-SURF/3D has been expected as a useful tool to reproduce such flows. However, it is necessary to confirm the plasticity of the model by the detailed comparison with the results of the corresponding three-dimensional physical model.

This study performed an experiment by generating a solitary wave that collides and overtops a model structure, and examined the three dimensional behaviors. Next, the numerical analysis using CADMAS-SURF/3D was conducted under the same wave-structure condition as the experiment. By comparing both results, the three dimensional characteristics of the tsunami flows around the model structure are investigated, and applicability of the numerical model is discussed.