土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. 70, No. 2, 2014, I_306-I_310

陸上構造物に作用する津波波圧と波向の影響に関する実験的研究

Experimental Study on Influence between Tsunami Wave Direction and Wave Pressure Acting on Structures

髙橋研也[1]・前田勇司[1]・西畑　剛[2]・古牧大樹[3]

Kenya TAKAHASHI, Yuuji MAEDA, Takeshi NISHIHATA and Daiki FURUMAKI

Hydraulic experiments to inspect the influence between tsunami wave direction and wave pressure acting on shore structures has been conducted. Cubic and cylindrical foam structures on which pressure gages are attached are installed in the wave basin and are able to rotate themselves to measure tsunami wave pressure with some incident angles. Surge tsunamis are generated under the condition with various still water depths and wave heights including impulsive undular bore. Observed wave pressures on the structures tend to decrease with the increase of the incident angle of the tsunamis. Additionally, 3D numerical simulations to reproduce the experiments have been done, which well agreed with the experiments if the wave direction is not greater than 45 degree and large impulsive wave pressure is observed.

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波において多くの陸上構造物が被害を受けた．陸上構造物に作用する津波の設計波圧を算定する際，それまでの設計実務においては，「津波避難ビル等に係るガイドライン（内閣府，2005；以下，旧ガイドラインと呼ぶ）」が広く基準として用いられてきた．旧ガイドライン中，朝倉ら（2000）による静水圧を定数倍した波圧評価式が採用されているが，東日本大震災の津波被害調査結果を受けて見直しが進んでいる．例えば，「津波避難ビル等の構造上の要件の解説（国土交通省国土技術政策総合研究所・建築性能基準推進協会，2012）」では，遮蔽域や汀線からの距離等に応じた波圧の低減係数が提唱されている．陸上構造物壁面の津波に対する入射角度によっても津波の作用波圧は低減されると考えられ，旧ガイドライン中でも触れられてはいるものの，震災後に出された指針を含め，津波の入射角度と低減係数の関係までを明らかにした文献は見られない．

一方，陸上構造物へ作用する津波波圧に関する水理模型実験や数値実験も震災後，数多く行われている（例えば，松山ら，2012；中村ら，2013；榊山，2012；有光ら，2012；有川ら，2013等）．しかし，これらの多くは断面的な検討が多く，陸上構造物に作用する津波波圧が入射角によってどのように変化するかという平面的な議論は未だ少なく，数値解析からも検証されていない状況にある．

本研究では，陸上に矩形状の建屋模型や円筒状のタンク模型を配置して構造物壁面に作用する波圧を計測し，津波の入射角と壁面の向きによって作用波圧がどのように変わるか水理模型実験から把握することを目的とした．

そして，既存の設計公式および数値解析結果との比較から，津波波圧と波向との関係を考察した．

2. 水理模型実験

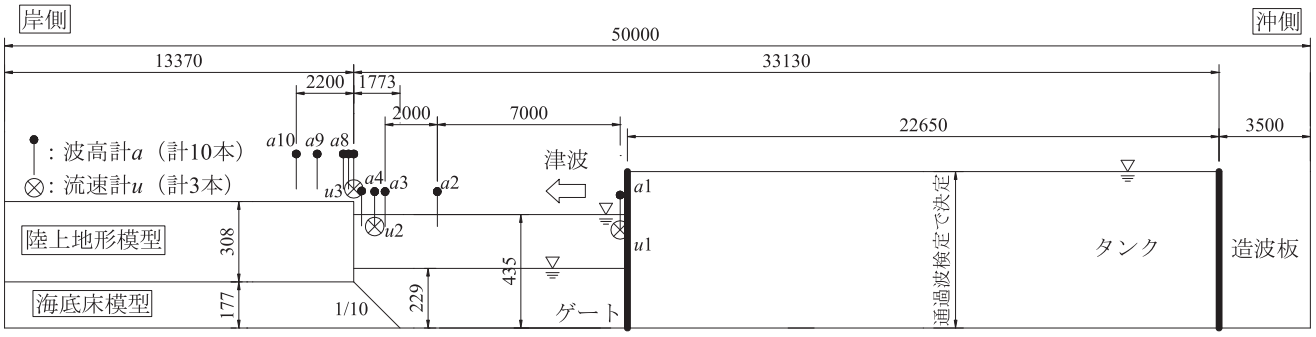
（1）実験方法

実験は，長さ50m，幅0.6m，高さ1.2mの断面水槽に海底勾配1/10の海底床模型と岸壁を有する陸上地形模型を設置して実施した．津波の造波は，髙橋・西畑（2014）による実験設定の一部と同様であり，岸壁から10.48m沖側に設置したゲートを急開させるダム破壊法を用いた．実験は押し波1波を対象として，波高計，流速計および圧力計による計測をサンプリング周波数500Hzにて行った．水深は2種類，津波高は3種類を設定し，合計4ケースの津波を検討した．**表-1**に検討ケースを入射津波条件，模型配置と併せて示す．また，**図-1**に実験断面図，**図-2**に構造物模型を示す．水槽内に設置した立方体形状の建屋模型と円筒状のタンク模型の前面6箇所，背面6箇所，計12箇所，側面鉛直方向に波圧計を取り付け，入射津波高を変えた津波を造波し，壁面に作用する津波波圧を計

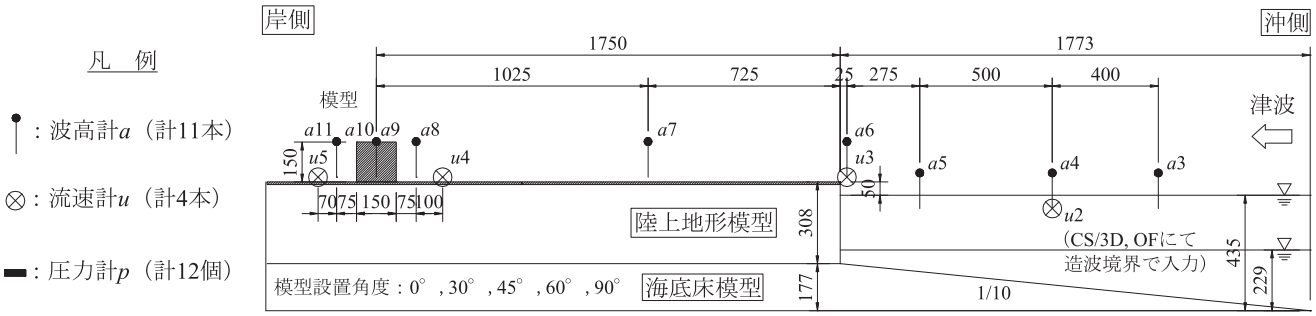
表-1　検討ケース

ケース	入射津波高（cm）	造波水深（cm）	模型種類	模型設置角度（°）
1	7.0	43.5	建屋（立方体） タンク（円筒形）	0, 30, 45, 60, 90
2	14.0			
3	25.8			
4		22.9		

1　正会員　修（工）　五洋建設（株）
2　正会員　博（工）　五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部
3　正会員　五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部



(a) 通過波検定（縦横比=10:1）



(b) 波圧実験と建屋模型の拡大図

図-1　実験断面図（単位：mm）

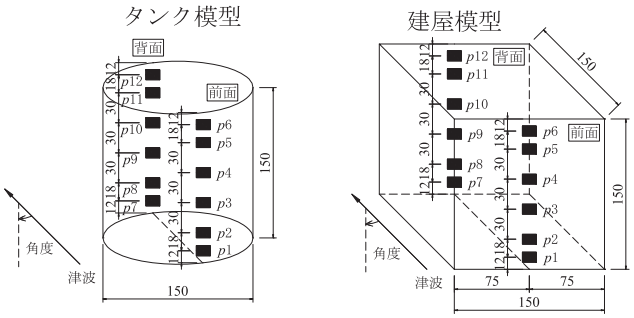


図-2　構造物模型（単位：mm）

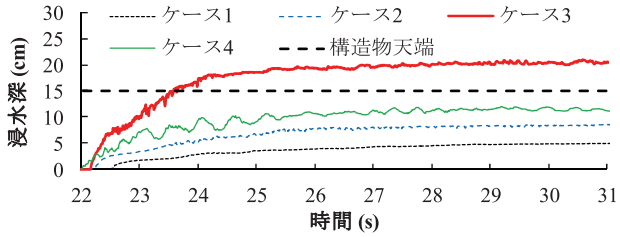


図-3　浸水深時系列（通過波検定，$a8$）

測した．模型の設置角度を段階的に0, 30, 45, 60, 90°と回転させて実験を繰り返し，模型前面および背面に作用する波圧を計測することで，津波の入射波向別波圧を把握した（前後両面で0, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150, 180°の計測角度となる）．なお，構造物模型はアクリル製であり，側面に波圧センサーを埋め込んだ上，海底床模型に堅固に固定した．建屋の立方体の辺およびタンクの円筒直径・円筒高さは15cmで統一した．

なお，入射津波高の決定に際しては，通過波検定を3回行い，海底床模型法肩に設置した波高計$a6$の平均計測値から津波高を決めた．また，模型位置および模型位置前後に設置した容量式波高計と流速計から進行波津波高および進行波流速を計測して，最大浸水深やフルード数を算定している．

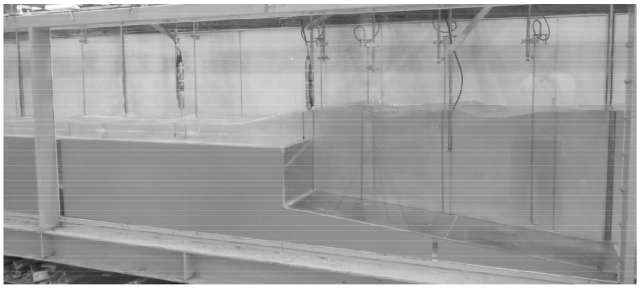


写真-1　通過波検定（ケース4）

表-2　最大浸水深とフルード数

ケース	入射津波高 (cm)	造波水深 (cm)	$a8$での最大浸水深h_i (cm)	h_iのときのフルード数
1	7.0	43.5	5.4	0.9
2	14.0		8.9	1.1
3	25.8		21.2	1.2
4		22.9	12.1	0.9

（2）通過波検定

図-3に模型なしの状態での模型前面位置$a8$における浸水深の変動時系列を示す．相対波高が大きいケース4は砕波段波となり分裂しながら遡上したが，他のケースでは顕著な分裂は生じなかった．**写真-1**にケース4の通過波検定状況を示す．また，Asakuraら（2002）で波力の水深係数を算定する際に用いられる$a8$における最大浸水深h_iとそのときのフルード数の関係は**表-2**に示す通りであり，最大浸水深記録時におけるフルード数は0.9～1.2の範囲となった．

（3）波圧実験

写真-2にケース3における津波の建屋模型（設置角度0°）への衝突状況を示す．津波は建屋前面壁でスプラッシュを上げて衝突していることがわかる．また，**図-4**にケース3における模型前面$p1$および背面$p7$に作用する波圧変動時系列を示す．模型前面の$p1$においては，建屋およびタンクともに遡上津波段波の衝突に伴う衝撃波圧が生じていることがわかるが，津波の入射角が大きくなるにつれて衝撃波圧が小さくなり，最大波圧に達するまでの時間も長くなった．また，模型前面における衝撃波圧は，$p1$から$p6$へと波圧計の設置高が大きくなるにつれて，建屋およびタンク模型共に緩和される傾向であった．一方，模型背面の$p7$においては，模型前面ほどは入射角の影響が見られず，ほぼ同様の波圧変動を示した．なお，建屋模型で背面角度180°（前面角度0°）のケースでは，構造物両側面から背後へ回りこんで来た津波や構造物上部を越流した津波の衝突に伴う波圧の極大が設置高によっては見られたものの，最大波圧には至らなかった．また，円筒型のタンクに作用する波圧は，側面（90°）で最小となっており，衝突直後の22.5sから24sにかけてはほぼゼロないし負圧を計測している．これは，藤井ら（2006）による防油堤がない場合の石油タンクに作用する津波波圧実験と同様の結果である．この側面で津波のエネルギーはほぼ速度水頭に変換され，圧力水頭がゼロないしナップを伴うことで負になっていると考えられる．90°を越えた背面では両側面から背後を回り込んだ津波によって，壁面作用波圧は上昇しているが，角度による差異は建屋のケース同様，あまり見られない．**図-5**，**図-6**に模型前面における無次元最大波圧分布と無次元高さの関係を示す．最大波圧の無次元化は進行波津波の浸水

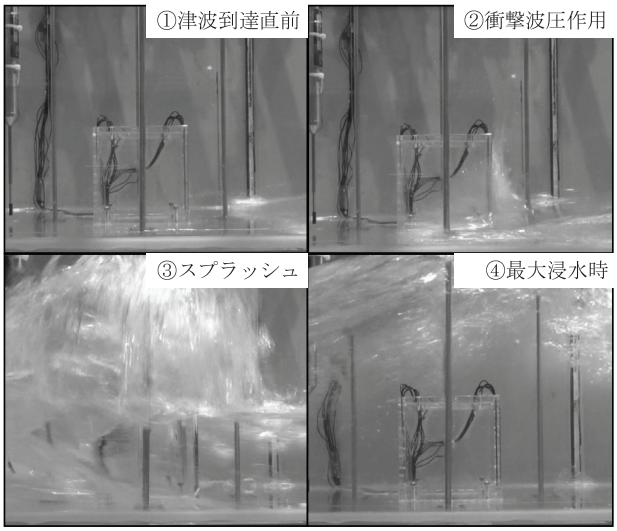


写真-2　実験状況（ケース3，建屋角度0°）

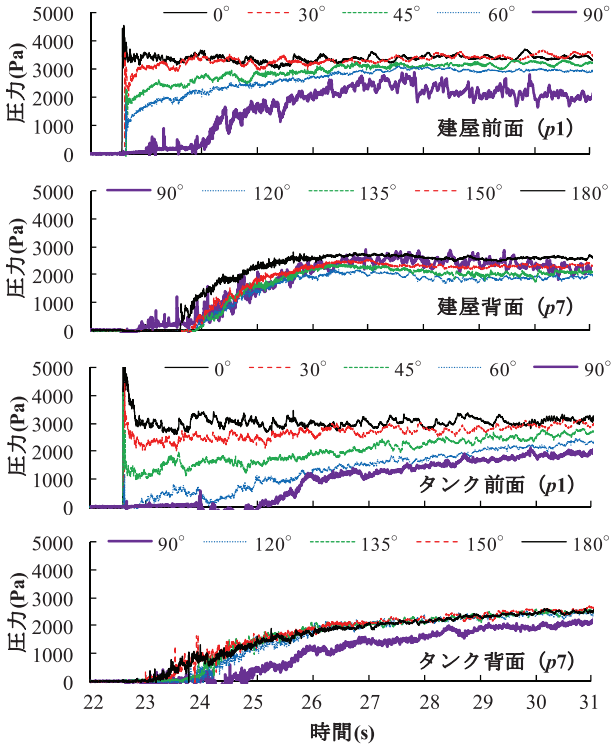


図-4　$p1, p7$での波圧変動時系列（ケース3）

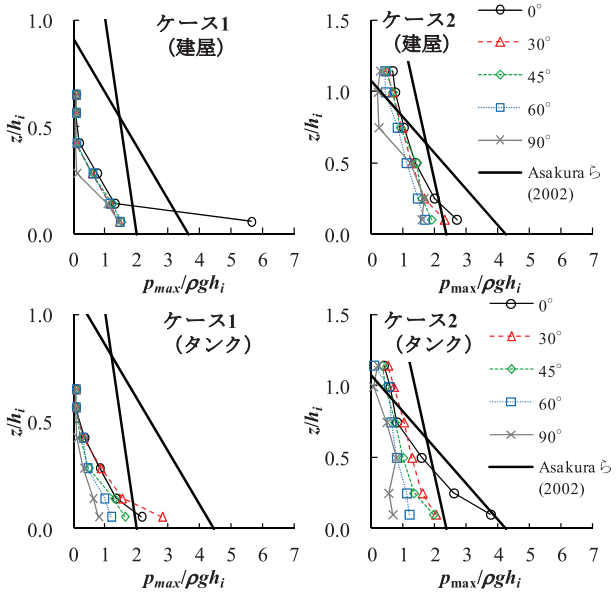


図-5　模型前面における無次元最大波圧分布とAsakura（2002）の式の比較（ケース1, 2）

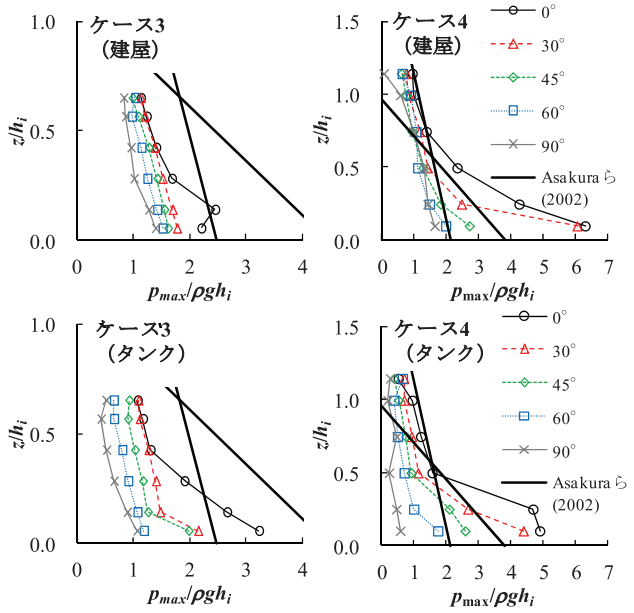


図-6　模型前面における無次元最大波圧分布と Asakura（2002）の式の比較（ケース3, 4）

深およびその静水圧で行い，図中には，Asakuraら（2002）による式も示した．砕波段波から分裂に至るケース4においては，津波の入射角度が小さい場合，Asakura式を超える衝撃波圧が特に地表面付近で明瞭に認められるが，入射角の増大に伴い顕著な衝撃波圧は緩和されていくことがわかる．

建屋模型の場合で入射角が45°を越えると津波波圧が70～50％程度まで低減されるため，衝撃波圧を考慮すべき波向の目安を与え得ると考えられる．

3. 3次元流体解析モデルによる再現計算

前章に示した津波波圧実験の再現計算を3次元流体解析モデルによって実施し，津波の入射波向と波圧に関する数値モデルの適用性を検証する．数値解析モデルは，津波解析への適用性が高いものの構造格子を扱うCADMAS-SURF/3D（沿岸技術研究センター，2010）および非構造格子を扱えるオープンソースであるOpenFOAM（ver.2.2.0）を用いる．

（1）CADMAS-SURF/3D

SMAC法に基づきNavier-Stokes式を差分し，VOF法による自由表面境界条件を与えるCADMAS-SURF/3Dによって，壁面に作用する津波波圧の解析を実施した．構造格子を用いるため，構造物の形状を完全には再現できないものの，不等間隔格子を用いて構造物周辺の格子間隔を細かく設定することで，なるべく実験模型に近い形状を再現した．津波は，**図-1**の波高計$a4$ないし流速計$u2$の計測水位・流速時系列をマトリックスデータとして境界から入射させた．計算条件を**表-3**に示す．

表-3　計算条件

解析モデル	CADMAS-SURF/3D	OpenFOAM
解析手法	差分法（SMAC法）	有限体積法（PISO法）
計算格子形状	構造格子	非構造格子
計算領域	x: 14.17m×y :0.60m×z :1.20m	
計算格子間隔	Δx =0.015 ～ 1.000m Δy =0.015 ～ 0.030m Δz =0.003 ～ 0.010m	Δx =0.015 ～ 0.100m Δy =0.015m Δz =0.005 ～ 0.0264m
総計算セル数	955,416	1,060,240
乱流モデル	使用しない	

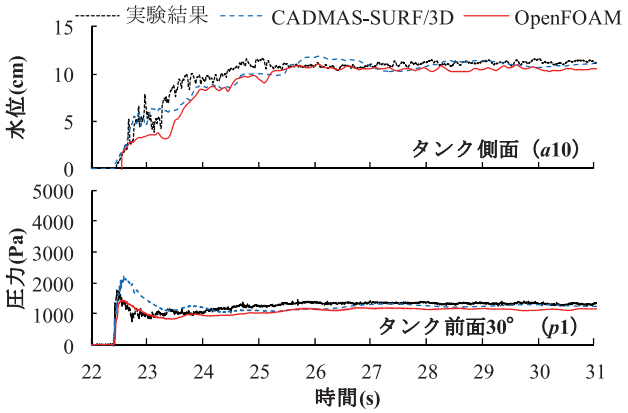


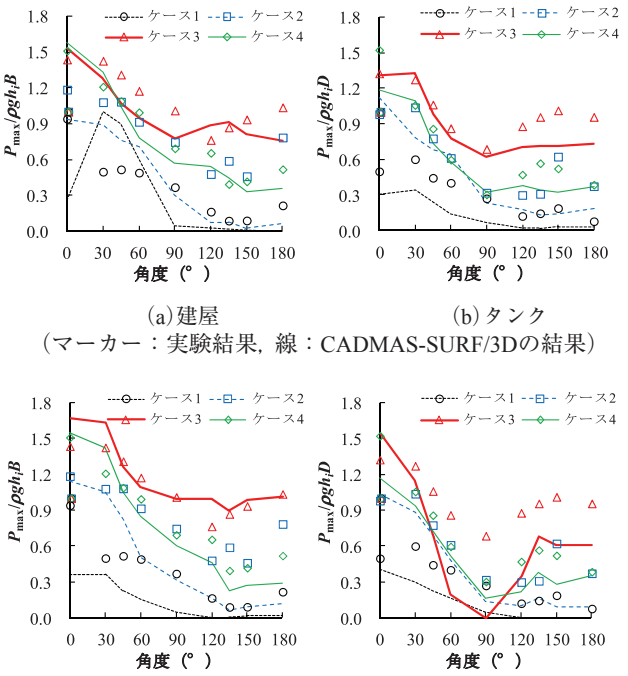
図-7　ケース2における実験と解析の比較（上：水位変動，下：圧力変動）

（2）OpenFOAM

有限体積法によってNavier-Stokes式を離散化するOpenFOAMによって津波波圧の解析を実施した．OpenFOAMには標準ソルバが複数搭載されているが，ここでは，非圧縮・非定常流れのソルバであるpisoFoamを用いた．有限体積法に基づくため，角度を回転させた建屋や円筒状のタンク模型のモデル化も容易であるが，比較のため，構造物周辺はCADMAS-SURF/3Dの格子サイズに近い設定とした．入射境界も同様の位置とした．計算条件を**表-3**に併せて示した．

（3）解析結果

ケース2における水位変動および波圧変動の実験結果と計算結果の比較を**図-7**に例示する．建屋モデル，タンクモデルに対し，入射角度が45度以下のケースにおいては，2つの解析モデルは同程度に結果を再現しており，水位，波圧とも解析による再現性は良好であった．一方，入射波向がそれよりも大きくなった場合，両モデルとも波圧の再現性に課題を残す結果となった．**図-8**に壁面に作用する無次元最大波力（最大波力を進行波津波静水圧と構造物幅/直径で除す）に関する実験と数値解析の比較を示す．格子間隔に対して津波規模が小さかったケース1を除き，入射角0°～45°程度までは最大波力の再現性は認められ，実務への適用が期待できる．一方，それ以上の角度においては，入射角と波圧の定性的な傾向は再現



(a)建屋　(b)タンク
（マーカー：実験結果，線：CADMAS-SURF/3Dの結果）

(c)建屋　(d)タンク
（マーカー：実験結果，線：OpenFOAMの結果）

図-8　壁面に作用する無次元最大波力の比較

するものの，ケースによっては背面へ回りこむ津波や建物を越流する津波の再現性などに問題があった．両解析モデルとも乱流モデルは適用しておらず，格子サイズもやや粗いため，建物背面や側面における剥離渦やナップ現象等の再現が難しいことに加え，建物への津波の衝突に伴う気泡の混入等が不整合の理由として考えられる．解析の定量的な精度向上については，今後の課題とする．

4. おわりに

本研究では陸上構造物に作用する津波波圧に関する水理模型実験を実施し，構造物壁面と入射波向の影響を検証した．併せて3次元数値モデルによる再現解析も実施した．得られた結論を以下にまとめる．

(1) 水理模型実験から，立方体形状の建屋，円筒形状のタンクとも遡上した津波による衝撃波圧を計測した．津波の入射角度が大きくなるにつれて衝撃波圧は小さくなり，最大波圧に達するまでの時間も長くなった．

(2) 衝撃波圧は構造物下部の地表面付近で顕著であり，特に砕波段波から分裂に至るケース4では，入射角度によっては，その大きさがAsakura式を超える時もあった．この場合も，入射角度が大きくなるにつれて，その大きさは低減した．

(3) 模型背面における津波波圧は，角度によらずほぼ一定である．建屋の場合，入射角度が45度を超えると津波波圧が大幅に低減されるため，衝撃波圧を考慮すべき一つの目安を与え得る．

(4) CADMAS-SURF/3D，OpenFOAMを用いた3次元数値解析モデルによる再現解析では，両解析モデルとも入射角度45度程度までは，衝撃的な津波波力の再現性は期待できる結果となった．一方，それ以上の角度となった場合や津波波力自体が小さい場合，解析は実験を定性的には再現するものの，ケースによっては定量的な再現ができなかった．背面へ回り込む津波や構造物を越流した後の津波波圧の再現性に問題があると考えられ，今後の研究課題である．

参　考　文　献

朝倉良介・岩瀬浩二・池谷　毅・高尾　誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則（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.

有川太郎・渡邉政博・窪田幸一郎（2013）：津波による橋梁の安定性に関する検討，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp. I_911-I_915.

有光　剛・大江一也・川崎浩司（2012）：構造物前面の浸水深と流速を用いた津波波圧の評価手法に関する水理実験，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp. I_776-I_780.

国土交通省国土技術政策総合研究所・一般社団法人建築性能基準推進協会（2012）：津波避難ビル等の構造上の要件の解説，38 p.

財団法人沿岸技術研究センター（2010）：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会報告書－，沿岸技術ライブラリー，No.39，235 p.

榊山　勉（2012）：陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp. I_771-I_775.

髙橋研也・西畑　剛（2014）：津波来襲時の地下管路内における気液二相流の圧力変動に関する実験的研究，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.70，No.2，（印刷中）.

内閣府（2005）：津波避難ビル等に係るガイドライン，68 p.

中村友昭・澤祐太朗・Xingyue REN・水谷法美（2013）：橋桁への作用津波力と橋桁の流出限界に関する実験的研究，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.69，No.2，pp. I_335-I_340.

藤井直樹・大森政則・池谷　毅・稲垣　聡（2006）：石油タンクに作用する津波波力と被害予測手法，海岸工学論文集，第53巻，pp. 271-275.

松山昌史・内野大介・橋　和正・田中良仁・榊山　勉・仲村治朗・稲葉大介（2012）：盛土を越流する津波に対する防波壁の効果に関する実験，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp. I_236-I_240.

Asakura, R., K. Iwase, T. Ikeya, M. Takao, T. Kaneto, N. Fujii and M. Ohmori (2002) : The tsunami wave force acting on land structures, Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 1191-1202.

OpenFOAM Foundation : OpenFOAM, http://www.openfoam.com/, 参照2013-03-06.