

学 位 論 文 の 要 旨

氏 名	石本 健治
学位論文題目	3次元数値波動解析法と構造物周辺の津波流動への適用 (Numerical Methods for Three Dimensional Wave Fields and their Applications to Tsunami Flows around Coastal Structures)

近年、高波、高潮、津波などによる海岸部の自然災害が多発している。特に、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の未曾有の大津波が、防波堤や防潮堤などの構造物に襲撃して甚大な被害をもたらした。当時の記録映像等によれば、構造物の周辺での津波の流れは、きわめて複雑な流動場を呈することがわかったが、現状では施設の安全性を検討する場合において、このような3次元的な流動特性を十分に考慮できているとは言えず、港湾工学・海岸工学分野における新たな技術課題と言える。

本論文は、その構造物周辺の3次元の流体運動をより高精度に解明するために、水理模型実験による3次元流動場の計測を行うとともに、先進的な数値波動解析（CADMAS-SURF、OpenFOAM）を実施し、両者の3次元流動の特徴を整理し、結果の比較検討を行うことで、先進的な数値解析技術がどの程度複雑な流動場の特徴を解明でき、効果的・効率的な設計に実用できるかを検討したものである。

第1章は、本研究の背景と目的を述べるとともに、本論文の構成と各章の概要を示した。

第2章は、本研究で使用した3次元流動場の数値解析モデルであるCADMAS-SURF/3DとOpenFOAMについて、それぞれ基礎方程式や解析の特徴について概説した。

CADMAS-SURF/3Dは、港湾施設や海岸施設などの沿岸構造物の耐波設計に特化して開発された数値解析モデルであり、波の伝播、越波、波-構造物間あるいは、波-構造物-地盤間の相互干渉等の現象解明に使われてきている。一方、OpenFOAMの海岸工学への適用に関する研究の歴史はごく新しいが、大規模3次元津波解析、津波の橋梁への衝突波形と波力、津波による空気層を考慮した揚圧力、砂浜地形上の遡上波と引き波の3次元流動などの現象について近年活発に研究がなされている。

第3章は、鹿児島大学の平面実験水槽内に導入された津波造波装置を用いた水理模型実験を実施し、有限長の正方形断面と台形断面を持つ2つの防波堤模型について、津波越流によって生じる構造物周辺の3次元流体場の複雑な挙動を明らかにした。防波堤模型の沖方から入射した波は、防波堤で反射されて再び沖方に向かうが、防波堤が設置されていない区間においても、反射波が回折の形で波が拡がっていく現象が見出された。防波堤上においては、越流によって水位が高くなり、越流のない区間へと横方向に流れが発生し、防波堤を越流後は水塊の落下によって波の状態から激しい渦や乱れを伴う流れの状態に移

行する状況が確認された。防波堤のない区間からの侵入波は、顕著なエネルギー減衰はなく、波動の性質を保持しており、この波が防波堤背後域に回折波として侵入し、激しい渦を伴う越流後の流れと小さな時間差を持って重なり合うことが判明した。

第4章は、水理模型実験と同じ構造物条件と波浪条件で、数値波動水路（CADMAS-SURF/3DとOpenFOAM）による3次元流動解析を実施した。CADMAS-SURF/3Dでは、正方形断面モデルは防波堤前面や直上で激しい打ち上げが発生し、このジェット水塊の発生があるところで、台形断面モデルに比べて数値解析による実験結果の再現精度が低下することが明らかになった。台形断面モデルは、幾つかの課題はあるが概ね良好な再現精度が得られることが確認できた。一方、OpenFOAMでは、正方形断面モデルでは実験と比べてやや小さいが同程度の津波ジェット流の打ち上げ高や、鉛直部で打ち上がったジェット流の「く」の字の形状を良好に再現した。また、実験時に撮影された打ち上げ波や越流波における水塊の分離現象も、数値解析結果は定性的ではあるが現象を再現しており、本数値解析手法が空中での水塊の分離を伴う現象を含めた気液混相状態の流れを表現しうることが明らかになった。

第5章は、実際の構造物に対してCADMAS-SURFとOpenFOAMを用いた設計等の事例を示し、その適用性を考察した。二重パラペット護岸の断面検討にCADMAS-SURF/2Dを用いた事例では、解析で求めた越波流量が、水理模型実験での越波流量と同等という結果が得られ、設計実務におけるCADMAS-SURFの適用性が確認できた。防潮堤に対するOpenFOAMの試験的検討例では、防潮堤を越流した津波による背後構造物への作用について、one-wayであるが防潮堤の倒壊挙動が表現できるモデル化および解析方法を提示した。津波解析から得られる時刻歴の津波波力を入力値とした構造解析によって、防潮堤の基部が損傷して回転しながら倒壊する結果が得られ、東北地方太平洋沖地震津波での倒壊事例の破壊モードの再現が可能であることがわかった。

第6章は、本研究で明らかになった主要な結論をまとめるとともに、今後検討すべき課題について論述した。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Numerical Methods for Three Dimensional Wave Fields and their Applications to
Tsunami Flows around Coastal Structures

Name: ISHIMOTO Kenji

The recent rise in occurrence of natural coastal hazards such as high waves, storm surges and tsunamis is a matter of considerable concern for coastal engineers and practitioners. Particularly, the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (2011 Tohoku Tsunami) has caused unprecedented huge damages on breakwaters and coastal dikes. Movies and photos taken at the catastrophic event show that the tsunami flows around coastal structures are highly complicated three dimensional behaviors. The present structurally resistive design against wave action does not sufficiently take into consideration for such 3D flow behaviors, therefore which provides a new technical subject in port & harbor engineering and coastal engineering.

This thesis aims to clarify the characteristics of 3D flow motions around coastal structures by conducting experiments in a 3D wave basin equipped a tsunami generator and analyzing two kinds of progressive numerical models: CADMAS-SURF and OpenFOAM. Through the comparisons between experimental and numerical results, the applicability of both numerical models; that is, how much details these models are able to describe the complicated flow structures, is discussed. Furthermore, the practical usability of these models from the aspects of efficiency and effectiveness is tested by applying actual coastal projects.

Chapter 1 explains the general backgrounds, motivations and objectives of the present study. This chapter also describes the main framework of the thesis and outlines of each chapter.

Chapter 2 introduces the fundamental theories and basic characteristics of both numerical models; CADMAS-SURF and OpenFOAM. CADMAS-SURF is developed in a special purpose for structurally resistive design of coastal facilities against wave action. The model has been used to express various phenomena as wave propagation, wave overtopping, wave-structure interaction, wave-structure-seabed interaction, so on. Whereas, OpenFOAM is a newly developed model possessing few application case studies in the field of coastal engineering. Since this model has great potential to reproduce transient mixture flows even in three dimensional ways, vigorous studies are now implemented to apply the model to various subjects, for example, 3D tsunami simulation in a wide computational region, tsunami uplift force on a lower bridge elements considering entrained air pressure, run-up and run-down waves on a sandy beach.

Chapter 3 describes the procedures of the experiments and the obtained results which was conducted in a 3D wave tank equipped with a tsunami flow generator. For the

breakwater models, two kind finite length models in alongshore direction possessing a square cross-section and a trapezoidal cross-section are arranged. The water surface fluctuations generated by the tsunami model flows are measured at a number of points including around the model breakwater. The following 3D tsunami flow characteristics are clarified; the reflected tsunami waves from the breakwater propagate back offshore in diffractive ways towards the alongshore region where the breakwater is not set. The flows over the top of the breakwater are found to partially run-down in the alongshore direction due to the lateral difference of the water level. The overflowed water mass from the breakwater transfers its form from wave-like one to flow-like one with intense vortexes and turbulence. The flow is further mixed with incident waves from the region where the breakwater is not set, and results in more complicated flows.

Chapter 4 is devoted to descriptions on the results of numerical analyses using CADMAS-SURF/3D and OpenFOAM, which were conducted under the same conditions of the above mentioned experimental set-up. For the intense and transient flows like an uprush in front of the square cross-section breakwater model, the performance of CADMAS-SURF/3D in precise flow reproduction is found to be fallen. For the trapezoidal cross-section model case where the flow motions are not so violent, this method provides satisfactory agreements with the corresponding experimental results. Whereas, OpenFOAM is found to yield good agreements even with the jet-like uprush flows. It is found that this method is able to reproduce qualitatively for the transient air-water mixture flows even when the water mass is torn into several parts.

Chapter 5 discusses the applicability of both numerical models to the design of real coastal structures. For a cross-section design case of a double parapet sea wall, the wave overtopping rate computed by CADMAS-SURF/2D shows equal amount with measured one in the model experiment. A trial application using OpenFOAM is implemented by examining how precisely the collapsing behaviors of a coastal sea wall by overflowed tsunami flows can be represented. The results reproduces physically reasonable behaviors as that the sea wall falls with rotating around the damaged basement. This property, although only qualitatively, seems to represent the real sea wall collapses occurred at 2011 Tohoku Tsunami.

Chapter 6 presents an overall summary of the conclusions of the study, and describes the future scope on what subjects relevant to the present study should be investigated.