

津波による港内流況の数値計算

藤井直樹*・大森政則*・高尾 誠**・大谷英夫***

1. はじめに

津波の来襲に伴う海底の侵食や堆積を定量的に把握するためには、津波時の流況を精度良く把握することが非常に重要である(高橋ら, 1991)。しかし、従来の津波に関する検討は主に水位を対象に実施されてきたため、津波の流速の再現精度については、これまで十分な検証が行われておらず、港湾を対象とした港内の渦の発生などの流況について検討した研究もほとんどない。

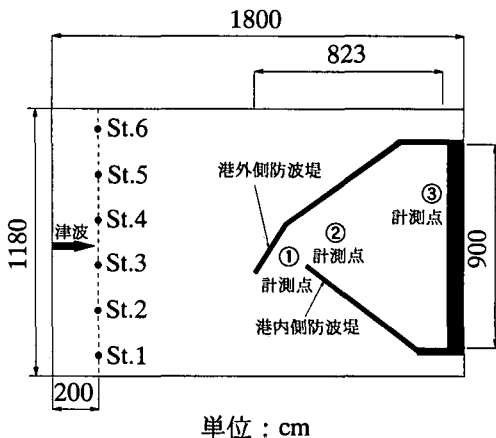
このことから前報(藤井ら, 1996)では、分裂及び砕波を伴う津波の流速の再現精度を確認することを目的に水理模型実験を実施し、津波数値計算として非線形長波理論方程式と波の分裂と砕波を考慮したブシネスク方程式を用いることにより、水理模型実験の水位・流速を良好に再現できることを確認した。ただし、得られた結果は断面2次元計算に対する結果であるため、平面2次元での検討が今後の課題として残されていた。

そこで本研究では、港湾模型を用いた水理模型実験を実施し、港内外の水位および流速の変化に関して詳細な実験を行った。そして、港湾を対象とした津波時の平面流況実験に対する再現計算を行い、計算と実験結果の比較から津波数値計算法の適用性および港湾内の流況特性について検討した。

2. 模型実験

(1) 実験装置

水理模型実験は、図一1に示すように平面水槽(長さ25 m×幅11.8 m)内に港湾模型(幅9 m×奥行8 m)を設置し、津波数値計算法の検証データを取得することを目的として実施した。模型縮尺は1/76.5であり、水深は8.5 cm(現地換算6.5 m)とした。造波装置は、プランジャーを上下させることによって津波模擬波を発生するものであり、プランジャーを下降させると押し波、上昇させると引き波が造波できる。



図一1 平面水槽および港湾模型

表一1 実験ケース

ケース	波の種類	造波時間(s)	現地換算(min)
1	押し波	30	4.4
2	引き波	30	4.4
3	正弦波	280	40.8

(2) 実験ケース

実験ケースは、表一1に示す3ケースであり、造波時間はプランジャーが動いている時間を示している。実験ケースは、波の周期による違いあるいは波の種類による違いを把握するために設定した。

(3) 計測項目

数値計算を行うためには、沖側入力境界における値を必要とする。そこで、計算に用いる境界の水位・流速波形を各実験ケースについて最初に計測した。計測点は、図一1に示す6点であり、抵抗線式波高計と電磁流速計を設置した。

港内の流況を解析するためには、流れを可視化することが有効な方法である。本計測では、水面にトレーサーを投入し、水槽天井からビデオ撮影した。このトレーサーの動きから流況を定量化するためにPTV (Particle Tracking Velocimetry) による画像解析を行い、平面流

* 正会員 東電設計(株) 原子力土木部
 ** 正会員 工修 東京電力(株) 原子力技術部
 *** 正会員 工修 大成建設(株) 技術研究所

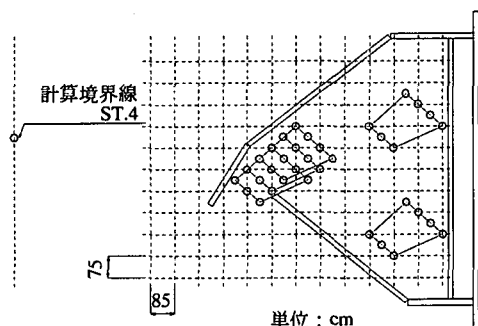


図-2 流速計計測位置

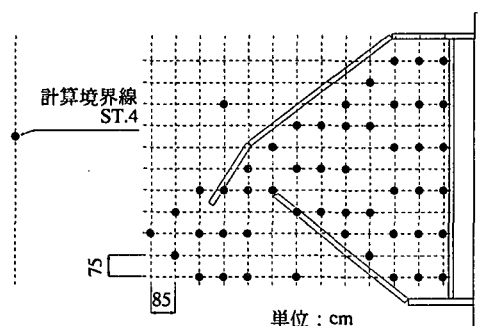


図-3 波高計計測位置

速分布を求めた。

可視化による計測では、水面の動きを求めているため、水面波による誤差が考えられる。そこで、図-2に示す各点において電磁流速計により平面2次元の流速を計測した。流速の計測高さは、水槽底面より2.5 cmである。また、港湾内外の水位分布を把握するため、図-3に示す各点において抵抗線式波高計により水位波形を計測した。

3. 数値計算の概要

数値計算に用いた支配方程式は、非線形長波理論式である。計算は、スタッガード格子、リーブフロッグ法により差分化して解く、一般的な長波の計算手法を用いた。

水理模型実験に対する計算格子間隔は2.5 cm、計算時間間隔は0.005秒とした。

沖側境界からの入力波としては、入力境界線で計測した6点の水位 η と流速 u の波形を用いた。沖側境界からの入力方法としては、入射波成分のみを与えて反射波は透過させる方法等考えられるが、計測した波形には入射波と反射波が含まれているため、本研究では入力地点(水深 h)の岸沖方向の線流量 $M(=u \times (h + \eta))$ を強制入力する方法を採用した。

4. 再現計算結果および考察

(1) 流速ベクトル

図-4は、押し波のケース1の場合の実験と計算による流速ベクトル図である。図中の時刻は造波開始から経過した時間を表し、3秒間隔で出力した。実験と計算結果に共通して次のような流況が理解できる。時刻23秒では港外側防波堤先端で剝離渦が発生し、流れが加速しながら港口部へ回り込んでいる。時刻26秒では港外側防波堤の剝離渦が大きくなり、港口部の流速は剝離渦による港口幅の減少によりさらに加速されながら港内へ流入する。このとき、港内側防波堤の端部背後に剝離渦が形成されはじめる。時刻29秒では、港内側防波堤背後の剝離渦が大きくなり、図中上方の防波堤側の流速が大きくなる。32秒以降は港内側防波堤背後の渦が発達し、港内で時計回りの循環流が発生する。循環流の中心は、時間とともに港内奥へと移動し、岸沖方向を長軸とした楕円形状の循環流となる。

港内流況の再現においては、剝離渦と循環流が重要であり、計算ではこれらの流況を非常に精度良く再現可能であることが確認できた。

図-5は、引き波の場合であるケース2の流速ベクトルである。流れは一樣に港口部に集中し流出している。流速の最大値は、港外側防波堤先端部に生じている。これらの流況は、計算と実験で非常に良く一致している。

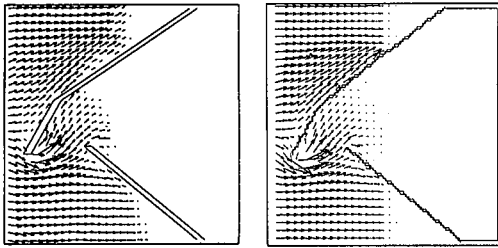
図-6は、周期の長いケース3の流速ベクトルである。時刻60秒は押し波時であり、ケース1とほぼ同様の流況を示している。時刻165秒は引き波時であり、流況はケース2と同様である。引き波時の港内の流速は、押し波時に比べて小さい。これらの流況は、実験と計算で非常に良く一致している。

以上の結果から、津波時の流況に関しては周期や波の種類によらず良い精度で再現できることがわかった。

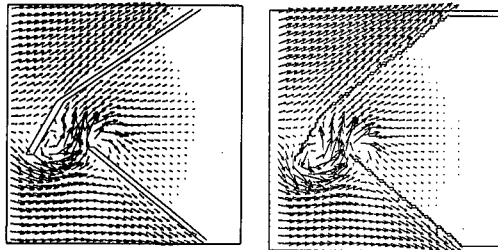
(2) 水位・流速波形

これまでは平面的な流況について比較してきたが、ここでは点で見た場合の再現性について、実験と計算の水位波形と流速波形の比較から検討した。流速は流速ベクトルの大きさを示している。比較する計測点は、図-1に示す①～③の3点である。

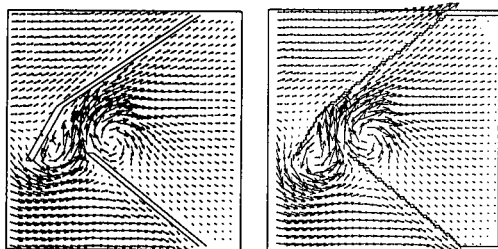
図-7にケース1の場合の実験と計算の水位波形と流速波形を示す。計測点①の実験の水位は、25秒付近で急激に低下し、これに対応した①の流速波形は、急激に大きくなっている。これは、港口部では流れの加速に伴い水位が低下し、射流に移移するためである。この射流と後の跳水については、ビデオ画像により確認している。計算結果は、流れの加速および水位の低下を良好に再現できており、今回用いた計算手法が射流や跳水現象



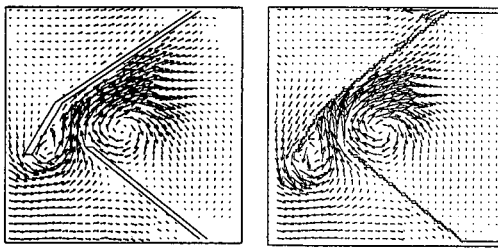
23秒後



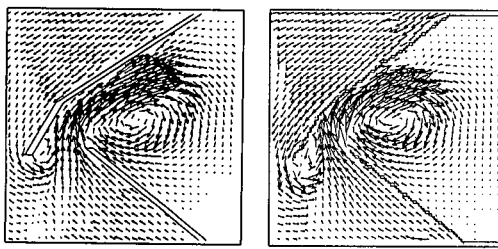
26秒後



29秒後



32秒後

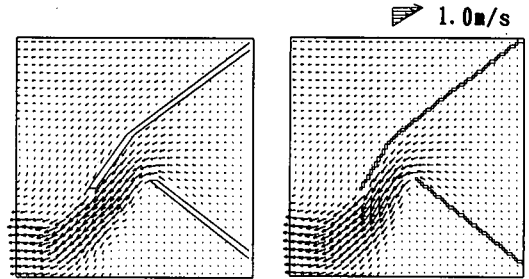


35秒後

1.0m/s

(a) 実験 (b) 計算

図-4 実験と計算の流速ベクトルの比較
(ケース1の場合: 押し波 30秒)

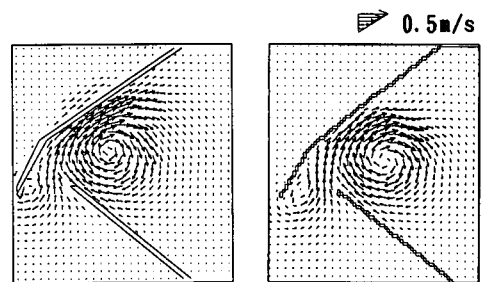


47秒後

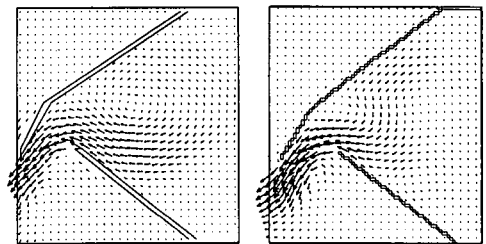
(a) 実験

(b) 計算

図-5 実験と計算の流速ベクトルの比較
(ケース2の場合: 引き波 30秒)



60秒後



165秒後

(a) 実験

(b) 計算

図-6 実験と計算の流速ベクトルの比較
(ケース3の場合: 正弦波 280秒)

に適用できることがわかった。

計測点②の水位の低下は、流速も低下していることと図-4の流速ベクトルから判断して渦の中心によるものと考えられる。計算は実験と良く一致していることから、剝離渦を精度良く再現できることを示している。

計測点③の流速が①と②に比べて小さいのは、港奥に位置するため循環流の影響が小さいことを示している。計算は実験と良く一致していることから、港奥までおよぶ大きな循環流を精度良く再現できることを示している。

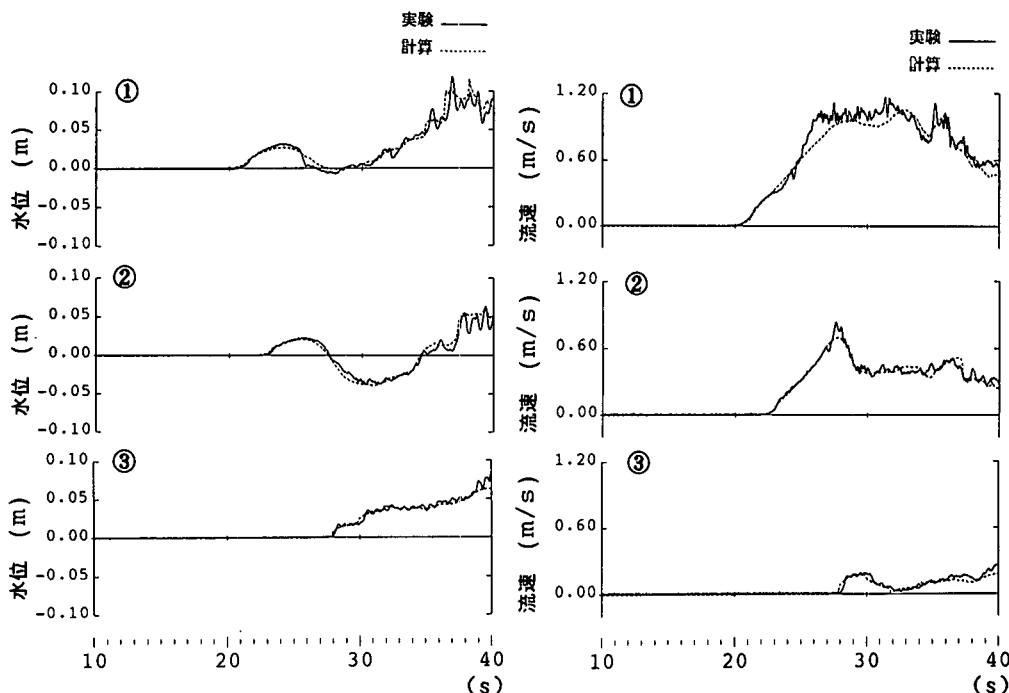


図-7 実験と計算の水位波形・流速波形の比較 (ケース1の場合: 押し波 30 秒)

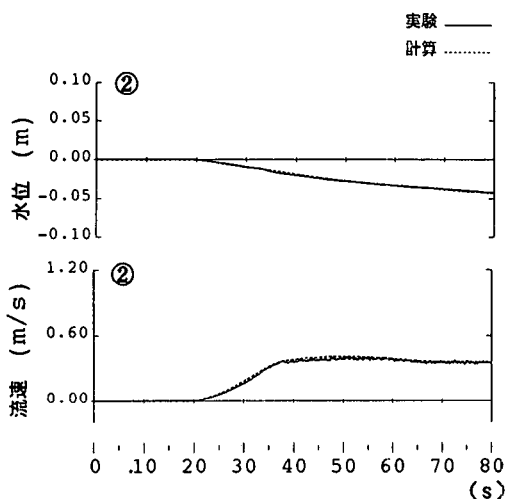


図-8 実験と計算の水位波形・流速波形の比較 (ケース2の場合: 引き波 30 秒)

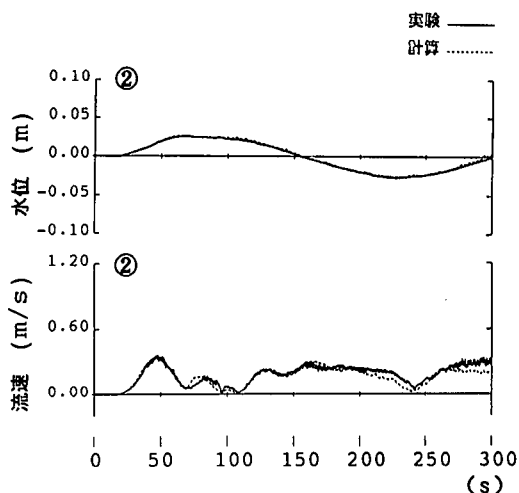


図-9 実験と計算の水位波形・流速波形の比較 (ケース3の場合: 正弦波 280 秒)

図-8 はケース2の場合であり、流速ベクトルの大きかった港口部でも水位変化は非常に緩やかである。計算と実験の水位・流速は一致している。

図-9 はケース3の場合であり、計算と実験の水位・流速とも良く一致している。

(3) フルード数

ケース1では射流および跳水が生じていたことをビデオより確認しているが、ここでは、実験結果あるいは計

算結果からそのことを確認することを目的にまずフルード数を求めた。

図-10 は港口部の計測点①における実験と計算のフルード数である。ケース1は26~32秒程度までフルード数が1を越えており、跳水の発生時間と一致している。一般の流れの場合と同様にフルード数が1程度で射流・跳水が発生し、計算でもその見極めが可能であることを示している。

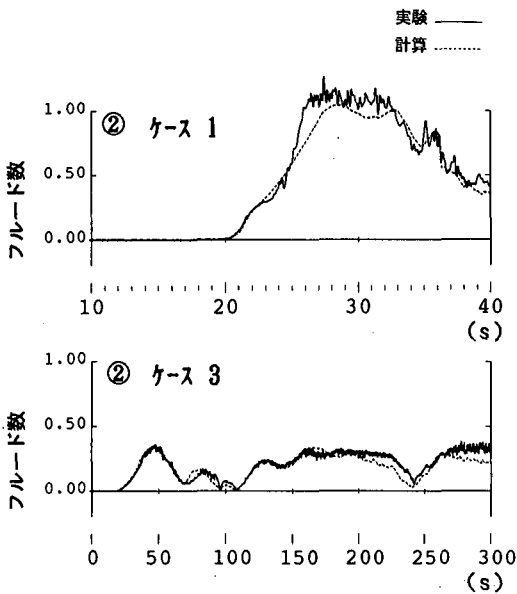


図-10 実験と計算のフルード数の比較

一方、ケース3のフルード数は、0.4以下であり、跳水が起こり得ない波であることが明らかである。

図-11はケース1の場合の計算から求めた港口から港湾内への通過流量を示している。跳水発生時間における流量を $0.085 \text{ m}^3/\text{s}$ 、通過有効流路幅は流速ベクトル図から港口幅 1.82 m の 0.7 倍と仮定して 1.27 m とすると、これらより限界水深は 7.7 cm と計算される。これは水位が静水深 8.5 cm を若干下回る程度で射流になることを示しており、実験や計算結果は限界水深程度まで水位が急激に低下し、射流が生じていることと整合している。

5. おわりに

本研究で得られた主要な結果は以下のようである。

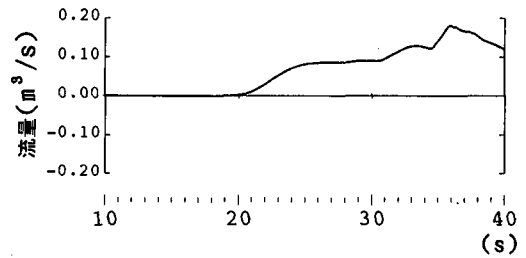


図-11 ケース1における港口部通過流量

1) 港内流況の再現においては、剝離渦と循環流が重要である。

2) 入射境界線で計測した水位と流速波形を用いて線流量で強制入力することにより、津波時の流況は周期や波の種類によらず良い精度で再現できることが確認できた。

3) 従来の非線形長波理論式に基づく計算は、流れの加速および水位の低下を良好に再現できており、射流や跳水現象、剝離渦、循環流にも適用できることがわかった。

4) フルード数または港口部通過流量から算定する限界水深を用いることにより、射流・跳水の発生を予測することができる。

謝辞：本研究を行うに際し東北大学工学部の首藤伸夫教授、田中仁教授、今村文彦助教授、高橋智幸助手から貴重なご指導を頂いたことを記して謝意を表する。

参考文献

- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1991): 津波による流れと海底変動に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.161-165.
 藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進 (1996): 津波の流速計算に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.291-295.