

流れを遡る津波の砕波現象を考慮した数値計算

防衛大 学生会員 ○笠原 健治
防衛大 正会員 藤間 功司
防衛大 正会員 嶋原 良典

1 はじめに

河川を遡上する津波が砕波し、砕波段波となって遡上する場合、橋などの河川構造物や船舶に大きな衝撃波力が作用すると考えられる。従って、砕波波高及び砕波位置を精度よく予測することは構造物の設計等において極めて重要である。既往の研究では静水中を伝播する津波の砕波限界や、砕波することなく逆流場を遡上する津波の挙動は明らかになりつつある。しかし、逆流場を遡上する津波の砕波現象に関する研究はほとんど行われていない。

著者ら¹⁾は砕波限界に水表面流速波速比を採用し、水理実験により一様流を遡上する津波の砕波限界を明らかにした。そこで、本研究では各種支配方程式を用いて水理実験の再現計算を行い、流れを遡上する津波の再現に適した支配方程式及び空間格子間隔に関する検討を行った。

2 流れを遡る津波の数値モデル

(1) 支配方程式と数値解析手法

以下の3つの支配方程式を用いて数値計算を行い、それぞれの計算結果を水理実験結果と比較した。水理実験において、伝播する波は非線形性と分散性の影響により、波形が急峻になり、波高が増幅して砕波に至る。式(1)の浅水理論は鉛直方向に対する運動は一様であるという静水圧近似をすることで導かれる。従って、波形と波高の変化を再現することは困難である。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^3 M}{\partial t \partial x^2} + \nu_\beta \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$$

$$\alpha = 0 \quad (1) \quad \alpha = \frac{h^2}{3} \quad (2) \quad \alpha = \frac{D^2}{3} \quad (3)$$

ここで M は線流量、 η は水位、 h は静水深、 D は全水深($=\eta+h$)、 g は重力加速度である。

一方、波形曲率に起因する鉛直方向加速度の効果を浅水理論に付加したものが非線形分散波理論である。本研究において、検討の対象とした式は、津波の数値計算で多用される鉛直積分型の Peregrine 式(式(2))及び分散項に非線形性を考慮した後藤の式(式(3))である。

右辺第2項は岩瀬ら²⁾の砕波減衰項である。 ν_β は渦動粘性係数であり、 $\nu_\beta = 0.23\sqrt{gD\eta}$ で表される。

連続の式は式(1)~(3)のいずれにおいても

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

である。

運動の式において線形項は2次精度の中心差分で差分化し、移流項は1次風上差分で計算した。

また、式(2)、(3)の場合、分散項を安定かつ効率的に計算できる2段階混合差分法³⁾を用い、移流項には2次精度の風上差分を採用した。

3 水理実験の再現計算

(1) 水理実験の概要

本研究で使用した実験装置を図1に示す。全長19m、幅0.4m、高さ0.3mの矩形断面水路であり、勾配は水平から1/60まで無段階に変化可能である。造波はフラップ型造波装置により行う。水路には給排水機構が設けられており、ポンプを作動させることにより、水路内の水を循環させることができる。

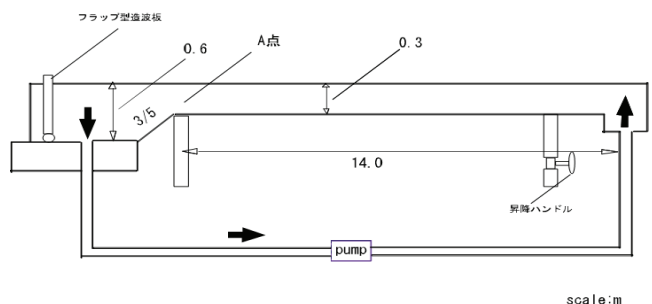


図1 実験装置の概要

キーワード 津波, 砕波, 数値計算, 格子間隔

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20 防衛大建設環境工学科 TEL 046-841-3810-3524

(2) 初期条件, 境界条件

河川流を模擬するため, 初期条件として全ての計算格子点に流量を与えた. 上流端境界条件として各計算ステップごとに流量を与え, 下流端境界条件は実験で使用した水路の入り口で測定した水位時系列を強制入射として与えた. 空間格子間隔 Δx , 時間格子間隔 Δt はそれぞれ 1cm, 0.005s とした.

(3) 計算結果

水理実験は入射波の波高と周期, 水深, 勾配及び流量を変化させ 21 ケース行った. いずれのケースも水路途中で砕波した. 図 1 はそのうちの 1 ケース (初期波高 2.2cm, 下流端水深 17cm, 勾配 1/100, 流量 0.0025m³/s) の下流端から 10m 地点における水位時系列の実験値と計算値を比較したものである. なお, 砕波減衰は岩瀬ら²⁾の手法を採用し, 砕波指標には水表面流速波速比を用いた.

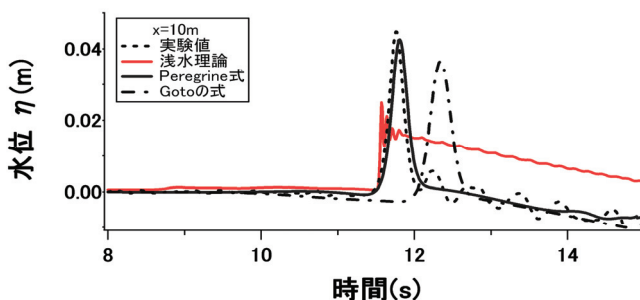


図 1 水理実験と数値計算結果の時間波形図

図 1 より, 浅水理論では波形勾配や波高の変化を表現できない. また, 岩瀬ら³⁾が指摘するとおり, 後藤の式は波高が過小評価になるとともに波速も遅くなる. 一方, Peregrine 式では伝播するにともなって急峻になる波形と水位の上昇及び波速をよく再現できている. このことは他の実験ケースの再現計算においても同様であった. したがって, 河川を遡上する津波の解析には鉛直方向加速度を考慮した非線形分散波理論を用いる必要がある.

(4) 空間格子間隔と伝播波形

次に, 空間格子間隔 Δx が数値計算結果に与える影響を検討するために, $\Delta x=0.5\text{cm}$, 1cm , 2cm , 4cm として数値計算を行い, その結果を水理実験結果と比較した (図 2). 図中, 白丸 (○) は水理実験における波高計の最大水位を示し, 黒丸 (●) は砕波点の波高を示す.

図 2 より, $\Delta x=0.01\text{m}$ で計算結果は実験値とよく一致している. それより細かくしても伝播波形に大きな差異はなく, 粗いと波高増幅を十分に再現できない. 本実験において, 入射波が砕波する直前の波長はいずれのケースにおいても 0.8~1.0m であった. このことから, 河川を遡上する津波の挙動を正確に再現するには 1 波長を 80~100 分割する必要がある. 波高増幅が再現できない主な原因として, Δx に比例して大きくなる数値粘性が考えられる.

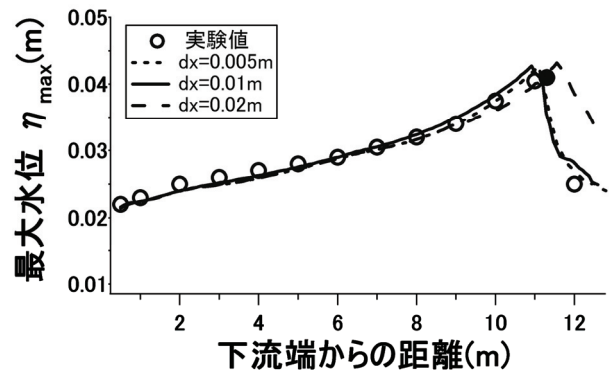


図 2 空間格子間隔と最大水位の関係

4 おわりに

水理実験の再現計算を通じて, 砕波現象を含め, 流れを遡る津波の解析に適した支配方程式, 空間格子間隔及び移流項の精度に関する検討を行った. 主な結論は以下の通りである. (1) 本現象の解析には鉛直方向加速度を考慮した非線形分散波理論を用いる必要がある. (2) 波高増幅を適切に再現するには波長を 80~100 分割できる空間格子間隔及び移流項に高精度の風上差分を適用する必要がある.

参考文献

- 1) 笠原健治ら 河川を遡上する砕波機構に関する研究, 土木学会関東支技術研究発表会講演概要集 第 35 回 (2008)
- 2) 岩瀬浩之ら ソリトン分裂波の砕波変形に関する水理実験と数値計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻 (2001)
- 3) 岩瀬浩之ら 津波の伝播計算を対象とした非線形分散長波式の比較, 土木学会論文集, No. 705 (2002)