

急勾配河川を遡上する津波の特性に関する一考察

寒地土木研究所 ○安田 浩保

1. はじめに

我が国の各地の太平洋沿岸では数百年周期の巨大地震とこれに伴う大津波の発生が予見されている。特に、このような自然災害を近代化後はじめて経験することとなるために万全の対策が要求されている。河川を遡上する津波への対策は、沿岸域における津波対策と比べて不十分と言わざるを得ない状況にある。著者は、これまでに緩勾配河川における河道内での津波の挙動に関する研究をいくつか行ってきた。これに引き続き、本文では新たな展開として、急勾配河川における津波の河川遡上問題に焦点を当てた。ほとんどの急勾配河川は中小規模であるが、河川の数で考えるとその数は非常に多く、この沿川に生活基盤を築いている人口や資産の総計は大きい。このため、急勾配河川における津波の挙動を理解することは重要である。本文では、急勾配河川に浸入した津波の挙動特性について数値解析により調べた。

2. 数値モデル

(1) 支配方程式

河道内に浸入した津波は分岐点を有する分岐現象と言え、この分岐点を経ると波頭部では静水圧の領域では見られない水位上昇を伴うソリトン分裂と呼ばれる波数分散現象を生じて波状段波を形成する。1986年の日本海中部沖地震津波¹⁾、2003年の十勝沖地震津波²⁾、2004年のインド洋大津波³⁾において、これらが河川に浸入した際にソリトン分裂を形成したことが報告されている。これらのことを踏まえ、著者が実施した既往の研究における数値解析ではその支配方程式に鉛直方向の加速度を加味した非線形分散波理論を適用している。

本文では、急勾配河川に浸入した津波を対象としているために波状段波の形成は考えにくい。しかし、周期が短く波形曲率が大きくなる条件下では非静水圧の効果が何らかの形で現象に寄与してくるものと考えられる。このことから、安田ら⁴⁾の解析と同様にアーセル数 Ur を1のオーダーとしたときに、

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{q^2}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{h^2}{3} \frac{\partial^3 q}{\partial t x^2} - \frac{C_f}{D^2} |q|q \quad (1)$$

として導かれる積分された Peregrine の式⁵⁾を非線形分散波理論式として適用する。このとき、これに対応する連続の式は、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

である。ここに、 q は流量フラックス、 t は時間座標、 D は水深、 x は流下方向座標、 η は水位、 h は水深、 C_f

は河床抵抗係数である。通常の河川流の解析に適用される浅水理論式による解析を比較のために行うものとし、式(1)の右辺第1項を除いた式系で記述される。

河床剪断力から津波が受ける影響に関しては式(1)の右辺第2項に示したとおり、水深と河床材粒径の関係から決定される河床抵抗係数を用いた表現を適用することにした。 C_f は、 $C_f = \frac{1}{\phi^2}$ のように書かれる。ここに、 ϕ は小規模河床形態に応じて決定される流速係数である。

(2) 数値計算法

物理分散項の作用が顕著な条件下における非線形分散波理論式の計算に対し、数値分散性を有する差分スキームを適用した場合、この影響も数値解に同時に反映されてくる。このため、打ち切り誤差特性までを視野に入れた差分スキームの選定が要求される。本文ではこれらのことを勘案し、移流項の計算に3次精度風上差分を適用した2段階混合差分法を用いた⁷⁾。

浅水理論式の計算に関しては、移流項以外に Leap-frog 法を適用し、移流項には1次精度風上差分を適用した。この式の移流項の計算においても前述の非線形分散波理論式の計算と同様に陰的解法を導入したり、高次精度差分スキームの適用したりなどの精度向上を図ることも当然可能である。ただし、高精度スキームを適用した計算では津波の波頭部の前傾化が十分に発達した際に Leap-frog スキームの数値分散性に起因して生じる波頭部の数値ギブス振動がより一層顕在化し、水位が過大評価されることを著者は確認している。これを回避するため、空間格子間隔が小さい場合では数値粘性による解の鈍化への懸念が小さいことなどから、適切な数値粘性の作用が期待できる1次精度風上差分を適用した。

3. 数値実験

(1) 実験条件

数値実験は、次の条件のもとで実施した。河川形状に関する条件は、河床勾配 1/750 の一様勾配、河口の河床高さを -2m、河口の水位を 1m、単位幅流量は 0.2, 0.4, 0.6 に設定し、これらの条件に基づく不等流水面を初期条件として与えた。一方で津波の入射は、河口の水位変動として与え、その形状は最大波高 1m、周期を 10, 20, 40 分の正弦波波形を設定した。ただし、正弦波の上に凸の半周期を基本波形(1周期)とし、これを1周期だけ入射した。実施実験ケースは、周期と単位幅流量のそれぞれを組み合わせた9パターンである。数値計算の条件は、空間格子間隔を 2m とした。

Key Words: 河川, 津波, 数値解析, 非静水圧, 非線形分散波理論
〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目, TEL 011-841-1639, h-yasuda@ceri.go.jp

(2) 実験結果

実験結果は、各計算条件毎に最大水位の包絡線として図-1 (a)～(c) に示したとおりである。各図ともに太実線は非線形分散波理論式、細点線は浅水理論式の実験結果を示している。これらの図から以下のことを読み取ることができる。

まず、周期の増大に伴う変化については、周期が20、40分の場合、いずれの支配方程式においても入射最大波高と比べておよそ20%以上も水位が上昇する結果となった。これは、本実験で与えた条件のような河床勾配が急峻な場合では最大浸入距離が制限されるため、これに起因して生じていると考えられる。つぎに、支配方程式の違いによる解の差異については、実施した9つのパターンとともに非線形分散波理論式の解が浅水理論式のそれを上回る結果となった。特に、周期10分の場合では両者の差異が顕著となり、最大で7%程度も上回った。この原因は、周期が短いほどに波形の曲率が大きくなり、より鉛直方向加速度が卓越することが原因となり生じた水位上昇であると考えられる。なお、入射回数が複数回となるほどに支配方程式の違いによる解の差異は大きくなった。詳細については別途報告する予定である。

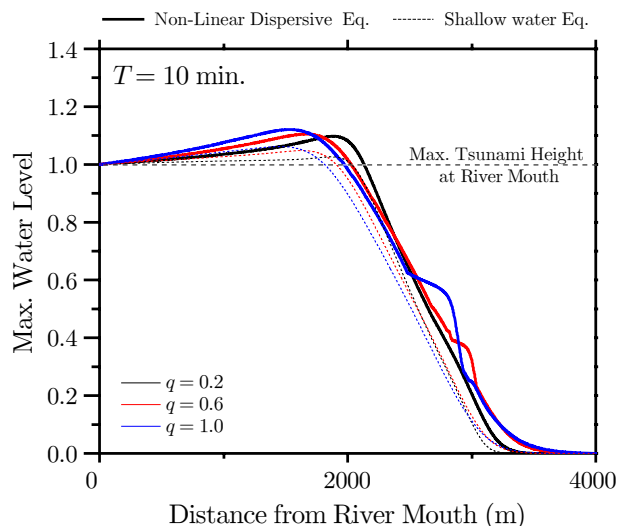
4. まとめ

従来までの津波の河川遡上問題においては、ソリトン分裂の形成に伴う水位上昇に焦点が当てられていた。急勾配河川では最大遡上可能距離が短くなりソリトン分裂は形成されにくいため、このような水位上昇の問題は軽視されがちである。しかし、本文で実施した計算で示されたようにソリトン分裂を形成しないまでも非静水圧の効果によって水位上昇が生じる可能性が示された。

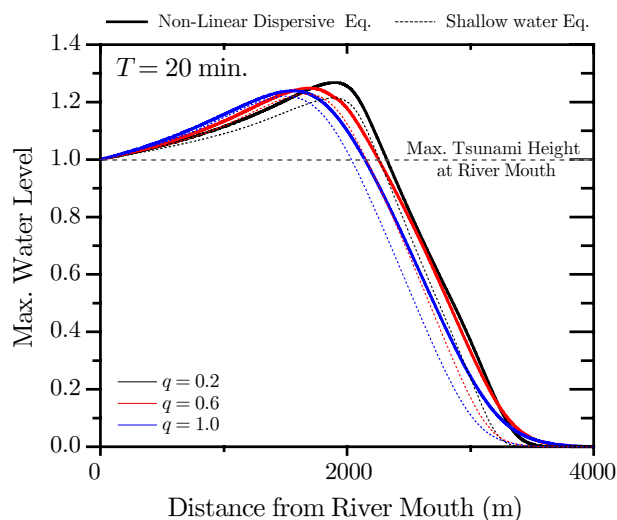
我が国の多くの河川ではこの数十年の間に河川改修が行われて洪水の疎通能力が大幅に向上した。この疎通能力の増大は、津波を河道内により容易に誘導することを意味している。今後は、大規模な緩勾配の河川のみならず、数多く存在する急勾配の中小河川に対しても適切な津波遡上の対策を講じる必要があるだろう。

参考文献

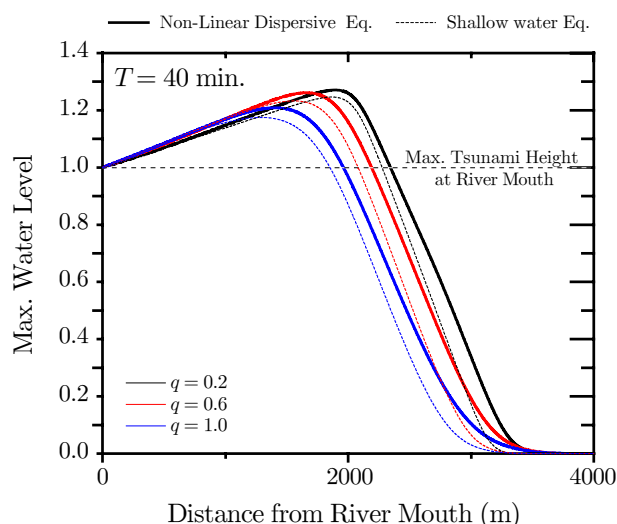
- 1) Tsuji, Y. and Yanuma, T. and Murata, I. and Fujiwara, C.: Tsunami Ascending in Rivers as an Undular Bore, *Natural Hazards* 4, pp.257-266, 1991.
- 2) 安田 浩保, 渡邊 康玄, 藤間 功司: 2003年9月の十勝沖地震に伴い発生した津波の河川遡上, 土木学会論文集, No.768/II-68, pp.209-218, 2004.
- 3) 田中 仁, 中川 一, 石野和男, 矢野真一郎, Bandara Nawarathna, 安田 浩保, 渡邊康玄, 長谷川和義: スマトラ沖地震津波によるスリランカでの被害に関する現地調査-河川被害を中心として-, 水工学論文集, Vol.50, 2006.
- 4) 安田 浩保, 渡邊 康玄: 河川を遡上する津波に関する数値的研究, 水工学論文集, Vol.49, pp.1327-1332, 2005.
- 5) Peregrine, D.H.: Long waves on a beach, *J. Fluid Mech.*, Vol.27, pp.815-827, 1967.
- 6) たとえば, 後藤 智明: 2段階混合差分法を用いた線形分散波方程式の数値計算における打ち切り誤差, 津波工学研究報告, 第20号, pp.13-22, 2003.
- 7) 安田 浩保: 河川を遡上する津波の1次元解析手法の提案と実現象への適用, 水工学論文集, Vol.50, 2006.



(a) 周期 10 分



(b) 周期 20 分



(c) 周期 40 分

図-1 最大水位包絡線（図中の太線は非線形分散波理論，細線は浅水理論の解析結果を示している）