

河川を遡上する津波の解析手法と実現象への適用

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム 安田 浩保

1. はじめに

津波は沿岸域に被害をもたらせるだけでなく、河川を遡上して河口から数km程度離れた沿川にさえ同程度の打撃を与える破壊力を秘めている。例えば、北海道の太平洋岸に河口を有する複数の河川において2003年の十勝沖地震津波が遡上・浸入したことは記憶に新しく、我々は現象の实在を強く認識するとともに、その危険性をまざまざと実感した。



図-1 ソリトン分裂を伴い十勝川を遡上する津波
(河口から3.2km上流地点、2003年9月26日6:30, 陸上自衛隊撮影。)

津波が河川遡上した際の危険性はこれまでも指摘されてきた。しかしながら、現象の解明に資するだけの十分な記録が蓄積されていないなどの理由で学術的な知見が十全に成されているとは言い難い状況にあり、例えば、その解析手法は確立されていないなどの問題点が挙げられる。

河川に浸入した津波の波頭部では重力加速度に比べて鉛直方向加速度が卓越して静水圧からのズレが生じる場合がある。その波頭部では静水圧の範囲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ことがある。1986年の日本海中部沖地震津波¹⁾、図-1に示した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発生したことが知られている。

これまでに河道内に浸入した津波に関する研究がいくつか^{1),4),5)}行われているが、KdV-Burgers方程式を用いた都司らの研究を除き、いずれとも静水圧の仮定のもとで導出される浅水理論に基づいて行われている。しかしながら、波数分散現象は静水圧の仮定のもとでは現れず、浅水理論式のような長波系方程式に基づき解析を行うなら非線形分散波理論(いわゆる Boussinesq 方程式⁶⁾)を適用しなければならない。

そこで、本研究は、河川に浸入した津波に対する河道計画によって設定されている治水施設の防御能力の評価や津波来襲時の樋門操作や避難区域の設定などに資する、河川を遡上する津波の解析手法について述べるとともに、2003年十勝沖地震津波が太平洋岸の直轄河川への浸入に関する再現計算を実施してその適用性について議論を行う。

2. 数理モデル

(1) 支配方程式

本研究では、安田ら⁷⁾の解析と同様にアーセル数 U_r を 1 のオーダーとして導かれる積分された Peregrine の式⁸⁾を非線形分散波理論式として適用する。この式の一般河道断面への適用を考えると、分散項の係数に一般断面における平均的な水深を意味する R を用いて、

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{Q^2}{A} \right] + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{R^2}{3} \frac{\partial^3 Q}{\partial t x^2} - \frac{C_f}{AD} |Q|Q \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

のように拡張される。ここに、 Q は河川流量、 t は時間座標、 A は流積、 x は流下方向座標、 η は水位、 C_f は河床抵抗係数、 R は径深、 B は水面幅である。

河床剪断力から津波が受ける影響に関しては、(2) 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の河床抵抗係数を用いた表現を適用することとし、河床抵抗係数は Engelund & Hansen¹⁰⁾の形式を用いた。

(2) 数値解析法

本研究では、これらの支配方程式の解を得るにあたり 2 段階混合差分法⁹⁾を適用した。このうち、移流項に関しては 3 次精度風上差分法を適用した。一方で、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。

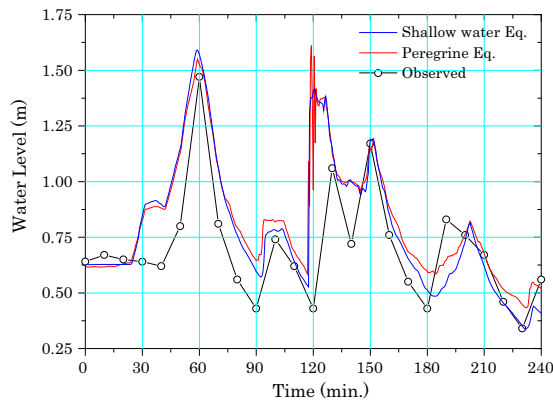
3. 実現象への適用

(1) 2003 年十勝沖地震津波の河川遡上現象

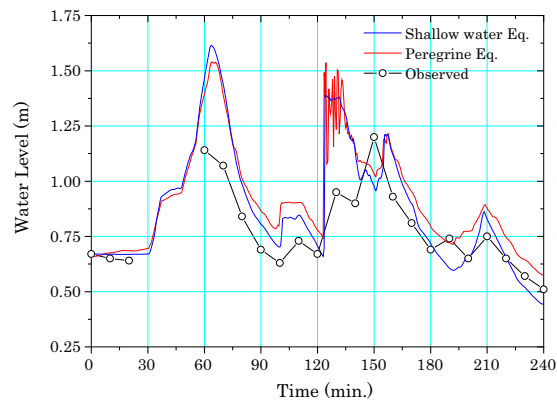
2003 年 9 月の十勝沖地震に伴い発生した津波は、少なくとも北海道の太平洋に面する十勝川、釧路川、沙流川、鶴川に浸入したことが確認されている。また、波状段波を形成して十勝川を遡上する津波の様子が自衛隊によりビデオ映像として撮影された。これらの河川の平均的な河床勾配はそれぞれ 1/5,000、1/7,500、1/750、1/1,000 程度である。

十勝川では河口からの流心距離にして約 9.5km の地点、釧路川では断面幅が急縮する河口からおよそ 8km の地点において津波浸入を示す明瞭な水位変動が観測された。一方、前述の二つの河川に比べて河床勾配が急な鶴川や沙流川においても、河口に最も近い水位観測所で津波と考えられる水位変動が観測された。

本研究では、前章までに述べた解析手法に基づき、これらの河川うち、十勝川における津波の遡上に関する再現計算を実施した。この地震により生じた津波は、地震発生から 4 時間の間に 6 波の津波が十勝川の河口に到達し、ここに到達した時点の周期は 30~40 分



(a) 旅来水位観測所（流心距離 7.5km）



(b) 導水路水位観測所（流心距離 9.0km）

図-2 10分間隔水位記録と再現計算結果との比較

程度であった。それらは、河口に到達した時点の波高にもよるが、大津から旅来までの7kmほどを20分程度で遡上していた。

(2) 再現計算の妥当性と考察

開発した解析手法の妥当性を確認するため、観測値と浅水理論式、および非線形分散波理論式に基づく数値計算の結果との比較を行った。図-2 (a), (b) に示すとおり、いずれの支配方程式による再現計算ともに各観測地点での津波の到達時刻は良好に再現されていると言えよう。水位に関しては観測値に対し計算値が若干過大となる傾向にあるものの概ね再現された。また、非線形分散波理論式に基づく計算から、第3波だけが明瞭な波状段波を形成していたことが明らかになった。

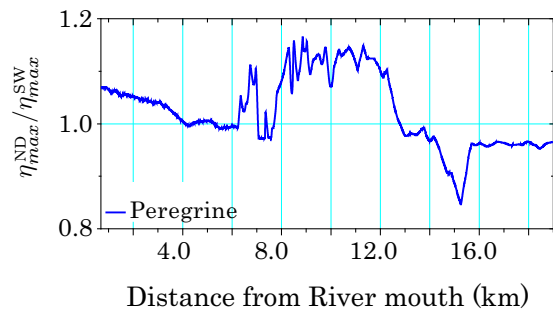


図-3 波数分散現象に伴う水位上昇率

津波が河川に浸入したことに伴う各地点における波数分散現象のみによる水位上昇率をそれぞれを図-3 に示すとおり調べた。同図中の η_{max}^{ND} は非線形分散波理論式の計算値から得た最大水位、 η_{max}^{SW} は浅水理論式により得たものである。同図から分かるとおり、少なくとも15%程度の波数分散現象に伴う水位上昇が数kmにわたり生じていたことが分かる。

(3) 再現計算結果に基づく実現象の考察

図-1 に示したように、波状段波を形成して十勝川を遡上する映像が自衛隊によって地震発生からおよそ100分後に河口から約3.2km(kp5.7)ほど上流の地点で撮影された。この撮影されたソリトン波列の波長を図-4 に示すとおり測定した。

その結果、最も上流側に位置する波群のそれぞれの波峰間距離 l_1 は多少ばらつきがあるものの 25m 程度、 l_2 は 20m 程度、 l_3 は 10m 程度であった。測定値と再現計算値の波峰間距離を比較したところ、両者は良く一致していた。ただし、今回適用した非線形分散波理論式による得られたソリトン素波の妥当性についてさらに検討を進める余地が残されている。

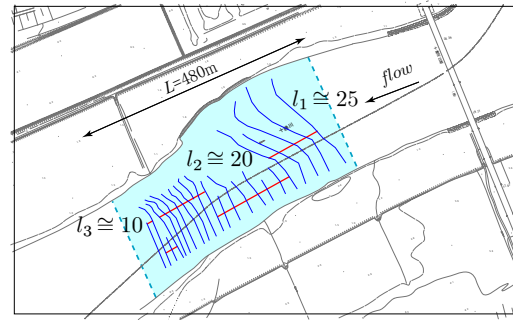


図-4 十勝川で撮影されたソリトン波列の波長

4. おわりに

河川に浸入した津波に対する治水施設の防御能力の評価やその来襲時の樋門操作や避難区域の設定などに資する 1 次元解析法を示し、これを実現象に適用してその妥当性を確認した。

その結果、簡便な解析法でありながら計算値と実測値は、到達時間、最大水位などさまざまな諸量ともに良好に一致する結果を得た。また、詳細な部分において多少の疑義があるものの、波数分散現象に伴う水位上昇が長距離区間にわたり無視し得ない規模で生じることが明らかとなった。

今後、水理実験を併用して、同現象が鋭い湾曲部や中規模河床形態から受ける影響、および有限振幅性が大きい場合における検討を実施する予定である。

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溯上, 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) 岩崎 敏夫, 阿部 至雄, 橋本 潔 : 河川津波の特性に関する研究, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp.74–77, 1977.
- 5) 後藤 智明, 首藤 伸夫 : 河川津波の遡上計算, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp.64–68, 1981.
- 6) Boussinesq, J. : Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal de vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond, *Liouville's J. Math.*, Vol.17, pp.55-108, 1872.
- 7) 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.
- 8) Peregrine, D.H. : Long waves on a beach, *J. Fluid Mech.*, Vol.27, pp.815–827, 1967.
- 9) 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.
- 10) Engelund & Hansen : *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Stream*, Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, 62p., 1967.