

一般断面を対象とした津波の 河川遡上計算

寒地土木研究所 寒地河川チーム 吉川 泰弘
寒地土木研究所 寒地河川チーム 平井 康幸
帯広開発建設部 治水課 桑村 貴志

2011年3月東北地方太平洋沖地震による津波は、河川を遡上し、内水氾濫を引き起こした。北海道の河川では内水氾濫は起こらなかったが、多くの河川で津波の河川遡上が確認され、その危険性が再認識された。このため、津波の河川遡上を予測する技術が望まれている。本研究は、高水敷を含めた一般断面を取り扱える計算モデルを開発し、定性的な知見を得るために、本計算モデルを用いて、河川流量、河床勾配、津波規模が河川遡上へ与える影響を検討した。

キーワード：河川津波，数値計算，感度分析，十勝川，北海道

1. はじめに

2011年3月東北地方太平洋沖地震による津波は、河川を遡上し堤防を越えて沿川地域へと流れ被害を拡大¹⁾させた。国土交通省による河川津波対策検討会では、この現状を踏まえて、津波の河川遡上の対策強化として堤防高の見直しを緊急的に提言した。この中で施設画上的堤防高の設定手法については、今次津波の河川遡上において左右岸で水位の差があったことから、平面2次元計算を推奨¹⁾している。

実際に、津波が河川を遡上した場合においては、防災・減災対応として、河川巡視を実施し時々刻々と変化する現場状況を把握して、適切な措置を迅速に行うこととなる。これらの対応を的確に行うためには、事前に河川巡視の時間帯・重点箇所などの巡視計画を作成しておくことが望まれる。しかし、津波の河川遡上は、津波の規模だけでなく河川流量に応じて異なり、河川縦断的な現象である。このため、地点毎の現地観測データのみでは、河川縦断的な現象を十分には把握できない。さらに、積雪寒冷地の河川では、流量規模が大きくなる時期として、洪水時よりも長期間となる融雪時が存在するため、河川流量の影響を考慮することが求められる。

本研究は、津波の河川遡上時の防災・減災対応を定める上で必要となる基礎資料を得ることを目的に、津波規模と流量規模に応じて計算が可能であり、より実際に近づけるために、堤防からの越流を考慮した河川津波の計算モデルの開発を試みた。開発した計算モデルの妥当性については、現地観測データとの比較から確認した。さらに、本計算モデルを用い

て、河川流量、河床勾配、津波規模が河川遡上へ与える影響を検討した。なお、本研究では災害直後の対応に着目していることから、本計算モデルを用いて、事前に、津波規模と河川流量に応じた計算を実施することを想定している。このため、本計算モデルは、平面2次元計算よりも計算負荷が小さい一般断面1次元不定流計算とした。

2. 河川津波の一般断面1次元不定流計算

本計算のフローを図-1に示す。図-1において、初期条件、境界条件は、計算上の時間と距離に関する値、時間毎の水理量と横断毎の河道に関する値を入力する。横断面データから各関係式を導出する方法は、横断測量データにおける最深河床高から、幾何学的に任意の間隔で水位を上昇させ、各水位における流積、潤辺、径深を算出する。これらのデータを用いて、任意の間隔毎に、線形式を立てることにより関係式を得る。次に、一般断面の不等流計算²⁾を行い、水理量の縦断的な初期条件を計算する。そして、合計時間まで Δt 毎に、水理量の境界条件を線形補完し、横越流量の式、連続の式、運動の方程式の計算を繰り返す。なお、横断面データから得られた各関係式は、運動の方程式の前で用いる。

(1) 横越流量の計算

横越流量の計算は、完全越流の場合の本間の越流公式³⁾である式(1)を基にして、有効疎通率 C と流入角 θ の補正⁴⁾を加えた式(2)を用いた。

$$Q_0 = 0.35 Bh' \sqrt{2gh'} \quad (1)$$

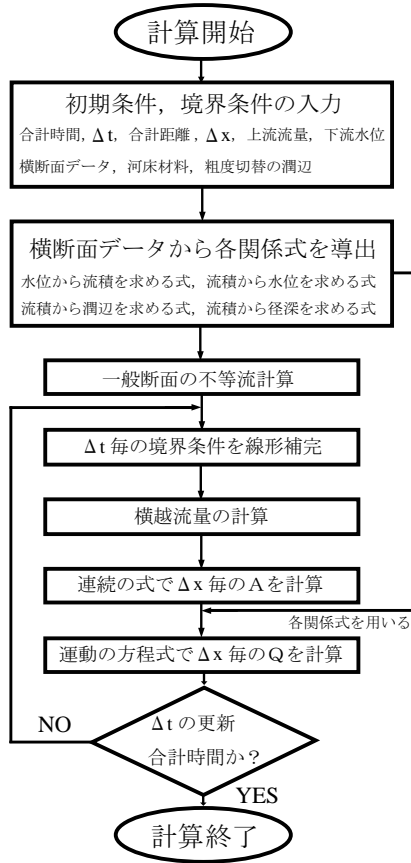


図-1 河川津波の一般断面 1次元不定流計算のフロー図

$$Q' = Q_0 \cdot (C \cdot \cos \theta) \quad (2)$$

Q_0 [m³/s]: 氾濫流量, B [m]: 越水幅, h' [m]: 越水水深, g [m/s²]: 重力加速度, Q' [m³/s]: 補正された越流量. 補正式⁴⁾は, 式 (3), 式 (4), 式 (5) である.

・ $I = 1/33600$ の場合

$$(C \cdot \cos \theta) = 1 \quad (3)$$

・ $1/33600 < I = 1/1580$ の場合

$$(C \cdot \cos \theta) = 0.14 + 0.19 \times \log_{10}(1/I) \quad (4)$$

・ $I > 1/1580$ の場合

$$(C \cdot \cos \theta) = 0.14 + 0.19 \times \log_{10}(1/I) \times \cos\left(\frac{2\pi}{360} (48 - 15 \times \log_{10}(1/I))\right) \quad (5)$$

C [無次元]: 有効疎通率, θ [rad]: 流入角, I [無次元]: 河床勾配である.

補正式を導出する過程において, 実務的な観点からパラメータを河床勾配としている⁴⁾. これは, 河床勾配が急になるほど, 水面勾配が大きく, 流速が速くなるため, 越流部の死水域部分による縮流が大きくなり, 結果として越流量が小さくなる影響を考慮したものである. また, 前提条件として, 通常

時の河川の流れは上流から下流へと流れるため, 河床勾配と水面勾配はほぼ等しいという仮定を基にしている. 一方で, 河川津波の流れは下流から上流へと流れるため, 河床勾配と水面勾配は等しくはならないと考えられる. このため, 本研究では, 河川津波時の横越流については, 式 (4) と式 (5) の I を, 計算断面毎の水面勾配 I_w とした. なお, 水面勾配 I_w は順流と逆流で正負を持つため, 式 (6) の I_w は絶対値を与えた.

$$I = I_w \quad (6)$$

(2) 流れの基礎式

連続の式は式 (7) を, 運動の方程式は式 (8) を用いた. 非線形分散波理論式は式 (8) の右辺第一項とした. この項は, 安田により提案⁵⁾された Peregrine の式⁶⁾を一般河道断面へ拡張した式である. なお, 本計算式は碎波を考慮していない.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial}{\partial x} (z + h) + \frac{g n^2 u^2 S}{R^{1/3}} = \frac{R^2}{3} \frac{\partial^3 Q}{\partial t \partial x^2} \quad (8)$$

A [m²]: 流積, Q [m³/s]: 流量, t [sec]: 時間, x [m]: 距離, z [m]: 河床高, h [m]: 水深, n [s/m^{1/3}]: Manning の粗度係数, u [m/s]: 流速, R [m]: 径深, S [m]: 潤辺である. 計算方法は, 従属変数を空間的に千鳥状 (staggered) に配置し時間的に蛙飛び (leap-frog) に進める差分式で行った. 非線形分散波理論式については, 2段階混合差分法⁷⁾を適用し陰的に解いた. なお, 越流する場合は, 河川流量から越流量を引き, 得られた越流後の河川流量を式 (7) の左辺第二項に与えた.

(3) Manning の粗度係数

一般断面においては, 低水路の粗度に加えて高水敷の粗度を評価する必要がある. 本計算モデルの Manning の粗度係数は, 低水路の粗度と高水敷の粗度を合成した式 (9) の合成粗度係数⁸⁾とした.

$$n' = \left(\frac{\sum_{i=1} (n_i^{3/2} \cdot S_i)}{S} \right)^{2/3} \quad (9)$$

n' [s/m^{1/3}]: 合成粗度係数, n_i [s/m^{1/3}]: 各部位 i の Manning の粗度係数 (例えば, 低水路の粗度 n_1 , 高水敷の粗度 n_2). S_i [m]: 各部位 i の潤辺 (例えば, 低水路の潤辺 S_1 , 高水敷の潤辺 S_2). S [m]: 合計した潤辺 (例えば, $S = S_1 + S_2$).



図-2 十勝川における水位観測所の位置図

3. 本計算モデルの妥当性

本計算モデルの妥当性を確認するために、実河川において水位の観測値と計算値の比較を行った。なお、本計算モデルの越流量においては、既往研究⁹⁾により、水理実験による越流量の実験値と計算値との比較から、その妥当性を確認している。

(1) 十勝川における河川津波

十勝川は沖積平野を緩やかに蛇行した後太平洋に注ぎ、下流部の河床勾配は約 1/3000 ~ 1/4500 である。阿部ら¹⁰⁾は、北海道内の新釧路川、十勝川、石狩川、鶴川、沙流川、留萌川、天塩川、網走川の計 8 河川を対象に、今次津波における河川遡上現象を水位記録から分析している。この 8 河川の中で最も大きな水位変動を記録している河川は、十勝川であることが報告されている。このため、本研究では、今次津波による水位変動が大きい十勝川を対象として計算を行った。

a) 計算条件

十勝川を図-2 に示す。計算期間は 2011 年 3 月 11 日 14:45 から 3 月 12 日 00:45 の計 10 時間、 Δt は 1 秒、計算区間は水位観測所地点を踏まえて河口から 3.2km から河口から 21.0km の計 17.8km、 Δx は 200m 毎に横断測量データが存在するため 200m とした。上流の流量は、図-2 の茂岩観測所の水位を HQ 式に代入して値を得た。下流の水位は、図-2 の大津観測所の 10 秒毎の水位を与えた。横断面データと河床材料は 2009 年に観測された値を与えた。

実河川における河床の Manning の粗度係数 n_b は、水深と河床材料を従属変数とする式 (10) に示す Limerinos 型 Bray の式¹¹⁾を用いた。

$$n_b = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{9.66 + 19.5 \log_{10}\left(\frac{R}{d_{84}}\right)} \quad (10)$$

$d_{84}[m]$: 84%粒径, なお、本研究では、式 (10) を一般断面に適用させるために、水深 h を径深 R に置き換えて用いた。

b) 観測値と計算値の比較

図-2 の旅来観測所 (河口から 9.3km) において、10 秒毎の水位の観測値と計算値を図-3 に示す。なお、本計算では 200m 毎に計算しているため、河口から 9.3km に位置する旅来観測所の水位と計算水位は直接比較が出来ない。このため、図-3 では、河

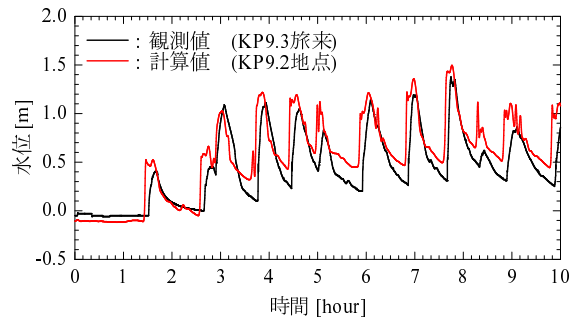


図-3 水位の観測値と計算値 (十勝川の河口から 9.3km 地点)

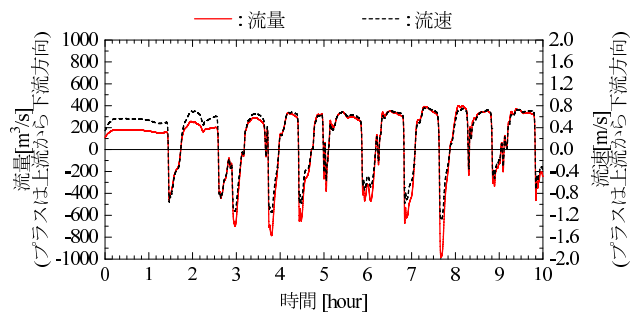


図-4 流量と流速の計算値 (十勝川の河口から 9.3km 地点)

口から 9.3km の観測水位と、河口から 9.2km の計算水位を比較している。

図-3 より、計算値は観測値の水位変動を良く再現している。今回の計算水位と観測水位の絶対誤差の平均値は約 17cm であった。

河口から 9.3km 地点の流量と流速の計算値を図-4 に示し、計算結果から得られた知見を以下に記す。

図-4 の赤実線の流量をみると、津波の河川遡上前は流量 110m³/s であったが、津波の河川遡上時では最大で、下流から上流への逆流 (押し波) の流量 983m³/s、上流から下流への順流 (引き波) の流量 400m³/s であった。最大値でみると、押し波時の流量は、遡上前の流量の約 9 倍の流量が上流へと流れ、引き波時の流量の約 2 倍の流量が上流へと流れている。つまり、押し波時の流量は、引き波時の流量よりも規模が大きい。一方で、流量の継続時間を見ると、押し波時の継続時間は、引き波時の継続時間よりも短い。なお、十勝川の茂岩観測所の豊水流量 (年間を通して 95 日間はこれを下回らない流量) は 250m³/s である。

図-4 の黒破線の流速をみると、津波の河川遡上

表-1 計算ケース

計算ケース	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7
河川流量 [m ³ /s]	500	100	1000	500	500	500	500
河床勾配 [無次元]	3000	3000	3000	3000	3000	1500	6000
最大津波 [m]	10	10	10	5	15	10	10

前は流速 0.34m/s であったが、津波の河川遡上時は最大で、下流から上流への逆流（押し波）の流速 1.29m/s，上流から下流への順流（引き波）の流速 0.76m/s であった。最大値でみると、押し波時の流速は、遡上前の流速の約 3.8 倍の流速で上流へと流れ、引き波時の流速の約 1.7 倍の流速で上流へと流れている。つまり、押し波時の流速は、引き波時の流速よりも速い。一方で、流速の継続時間をみると、押し波時の継続時間は、引き波時の継続時間よりも短い。

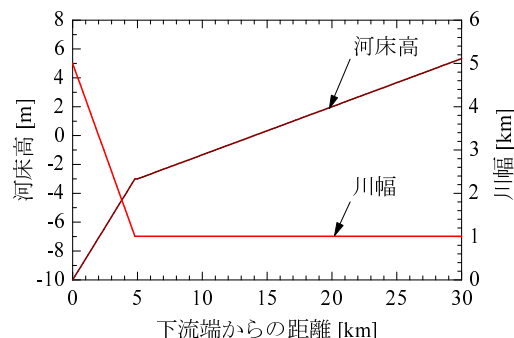


図-5 感度分析に用いた河床高と川幅

4. 本計算モデルを用いた感度分析

河川津波の定性的知見を得るために、本計算モデルを用いて、河川流量、河床勾配、津波規模が河川遡上へ与える影響を検討した。なお、本検討では、計算結果を単純化し検討が行い易いように越流は無視している。本検討の計算ケースを表-1 に示す。

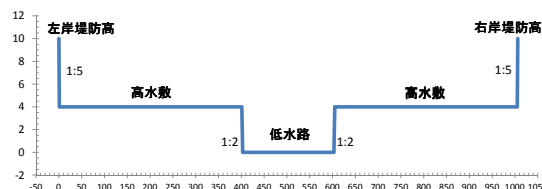


図-6 想定河川の横断面

本検討における津波の河川遡上地点の判定は、津波によって流水が河川を逆流する現象に着目し、計算上、海から河川への逆流の流速が確認された地点を河川遡上地点とした。この理由は、河川は順流の流れを対象にして計画・整備されており、逆流の流れに対して脆弱（護岸のめくれ等）であることが考えられる。このため、河川津波の対策を実施するにあたり、どこまで逆流の流れが出現するのかを明確にすることが重要と考えたためである。なお、河川水面の上昇を河川遡上の判定基準とする方法もある。

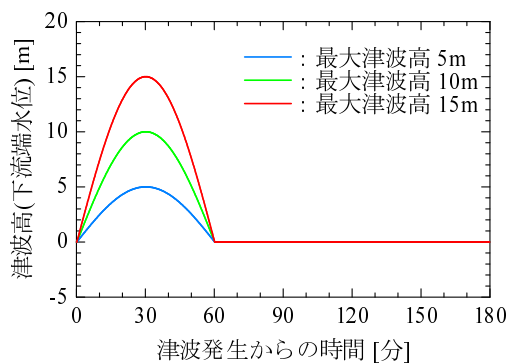


図-7 想定津波の時系列変化

(1) 計算条件

計算時間は津波発生時 1 時間と定常時 2 時間の計 3 時間とし、計算区間は海域を想定した 5km と河川を想定した 25km の計 30km とした。本計算に用いた縦断的な河床高と川幅を図-5 に示す。Δt は 1 秒とし、Δx は実河川において横断測量が実施されている間隔の 200m とした。想定河川の横断形状は、図-6 に示す断面を与え、低水路の Manning の粗度係数 n_l は 0.03，高水敷の Manning の粗度係数 n_h は 0.05 を与えた。境界条件として、上流の流量は一定値を与え、下流の水位は図-7 に示す想定津波の水位を与えた。

(2) 河川流量による河川津波への影響

河川縦断方向の津波来襲後の最大水位を図-8 に示す。図-8 の矢印は最大の河川遡上地点を示しており、矢印より下流の水位は津波来襲後の最大水位を示し、矢印より上流の水位は、河川遡上が確認されていないため、参考値として津波来襲前の河川水位を示した。図-8 の河川流量 100m³/s (case 2) と河川流量 500m³/s (case 1) の河川遡上距離をみると、河川流量が大きい場合 (case 1) の方が河川遡上距離は 5.4km 短い。一方で、河川流量 500m³/s (case 1) と河川流量 1000m³/s (case 3) の河川遡上距離をみると、河川流量が大きい場合 (case 3)

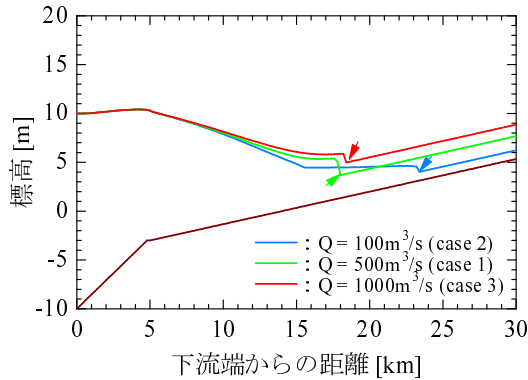


図-8 河川津波来襲後の最大水位（河川流量を変化）

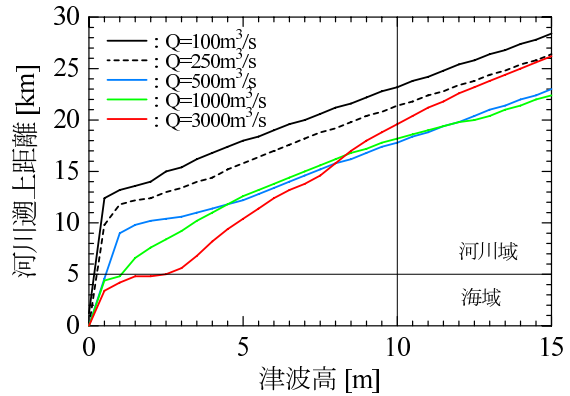


図-10 津波高と河川遡上距離（河川流量を変化）

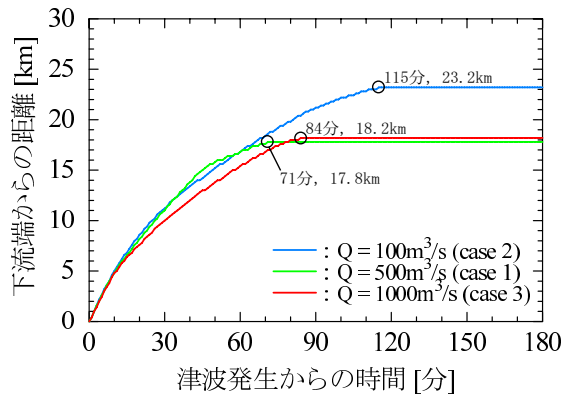


図-9 津波の河川遡上速度（河川流量を変化）

の方が河川遡上距離は 0.4km だけ長くなっている。

津波の河川遡上速度を図-9 に示す。図-9 には、横軸に時間、縦軸に下流端からの距離をとっており、勾配（距離÷時間）が河川遡上速度となる。また、河川遡上地点を丸で示し、この時の時間と距離を図中に明記した。図-9 の河川流量 $500\text{m}^3/\text{s}$ (case 1) と河川流量 $1000\text{m}^3/\text{s}$ (case 3) の河川遡上速度をみると、河川流量が大きい場合 (case 3) の方が河川遡上速度は遅くなっていることが分かる。

さらに、河川流量が河川遡上距離に与える影響についての検討を行った。5 パターンの河川流量を設定し、各流量パターン毎に、最大津波を 0.5m 毎に 0m から 15m まで変化させた計算を実施した。津波高と河川遡上距離の計算結果を図-10 に示す。図-10 より、津波高が大きいと河川遡上距離が長い。津波高が 4m より小さい場合は、河川流量が大きいと河川遡上距離が短くなる。一方で、津波高が 4m よりも大きい場合は、一義的には河川流量が大きいと河川遡上距離が短くなるとは言えず、津波高が 8m 以上の河川流量 $1000\text{m}^3/\text{s}$ と河川流量 $3000\text{m}^3/\text{s}$ をみると、河川流量が大きい場合 (河川流量 $3000\text{m}^3/\text{s}$) の方が河川遡上距離が長い。この原因の一つとして、津波来襲前の下流端水位は計算上 0m で固定しているため、河川流量が大きいほど津波来襲前の河川の水面勾配は緩くなる。このため、河川の水面勾配が

緩い流況では、津波の河川遡上の減衰効果が小さくなるため、河川遡上距離は長くなったと考えられる。

河川流量による河川津波への影響について、本計算結果を整理すると、河川遡上地点を逆流の流速が確認された地点とした場合において、河川流量が大きくなると河川遡上距離は短くなるが、ある一定の河川流量を超えて大きくなると、一義的には河川流量が大きいと河川遡上距離は短くなるとは言えない。

(3) 河床勾配による河川津波への影響

図-11 に、河川津波来襲後の最大水位を示す。図-11 の細い実線は河床高を示している。図-11 の河川遡上距離をみると、河床勾配が急勾配になると、河川遡上距離は短くなっており、河床勾配 $1/6000$ (case 7) から河床勾配 $1/3000$ (case 1) で 3.4km 短くなり、河床勾配 $1/3000$ (case 1) から河床勾配 $1/500$ (case 6) で 2.4km 短くなっている。

図-12 に、津波の河川遡上速度を示す。図-12 の河川遡上速度をみると、河床勾配が急勾配になると、河川遡上速度は遅くなっていることが分かる。

河床勾配による河川津波への影響について、本計算結果を整理すると、河床勾配が急勾配になると、河川遡上距離は短くなり河川遡上速度は遅くなる。

(4) 津波規模による河川津波への影響

図-13 に、河川津波来襲後の最大水位を示す。図-13 の河川遡上距離をみると、津波規模が大きくなると、河川遡上距離は長くなっており、最大津波 5m (case 4) から最大津波 10m (case 1) で 5.6km 長くなり、最大津波 10m (case 1) から最大津波 15m (case 5) で 5.0km 長くなっている。

図-14 に、津波の河川遡上速度を示す。図-14 の河川遡上速度をみると、津波規模が大きくなると、河川遡上速度は速くなっていることが分かる。

津波規模による河川津波への影響について、本計算結果を整理すると、津波規模が大きくなると、河川遡上距離は長くなり河川遡上速度は速くなる。

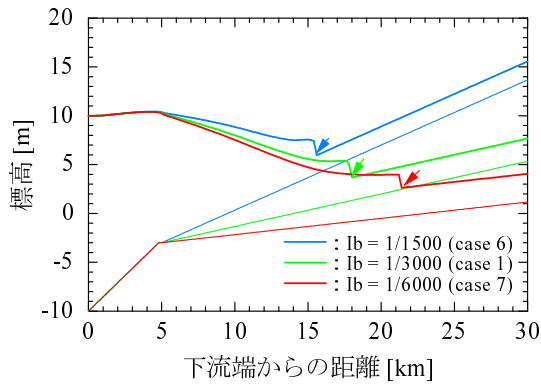


図-11 河川津波来襲後の最大水位（河床勾配を変化）

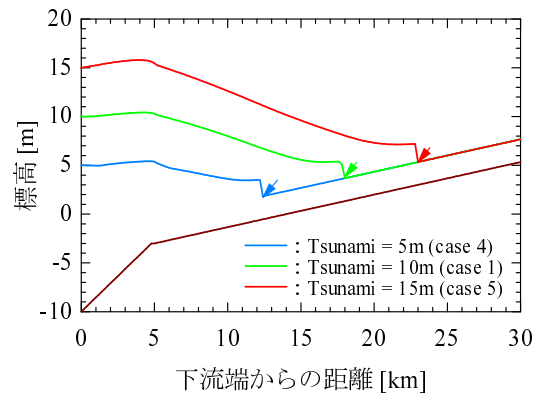


図-13 河川津波来襲後の最大水位（津波規模を変化）

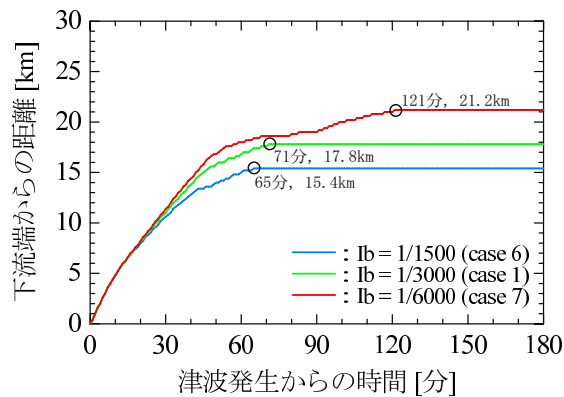


図-12 津波の河川遡上速度（河床勾配を変化）

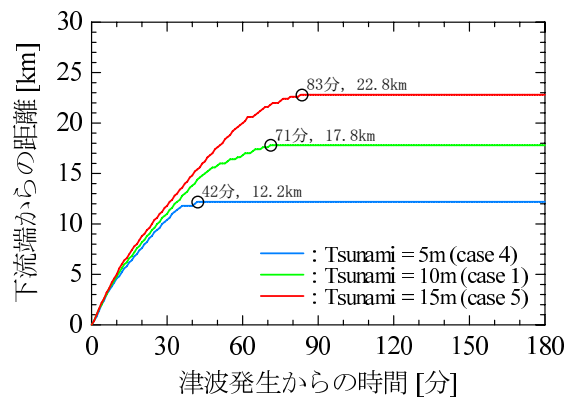


図-14 津波の河川遡上速度（津波規模を変化）

5. まとめ

河川津波の一般断面1次元不定流計算モデルを開発した。本計算モデルは、津波規模と流量規模に応じて計算が可能である。開発した計算モデルは、実河川における水位の観測値と計算値の比較から、計算結果の妥当性を確認した。2011年3月に十勝川を遡上した河川津波の計算結果から、押し波時の流量は、引き波時の流量よりも規模が大きく、押し波時の流量の継続時間は、引き波時の流量の継続時間よりも短いことが推定された。

本計算モデルの感度分析結果から、河川遡上地点を逆流の流速が確認された地点とした場合において、以下の河川津波に関する定性的知見が得られた。

- 1) 河川流量による河川津波への影響について、河川流量が大きくなると河川遡上距離は短くなるが、ある一定の河川流量を超えて大きくなると、一義的には河川流量が大きいと河川遡上距離は短くなるとは言えない。この要因の一つとして、津波来襲前の河川の水面勾配の影響が示唆された。
- 2) 河床勾配による河川津波への影響について、河床勾配が急勾配になると、河川遡上距離は短くなり河川遡上速度は遅くなる。
- 3) 津波規模による河川津波への影響について、津波規模が大きくなると、河川遡上距離は長くなり河川遡上速度は速くなる。

謝辞：本研究は、北海道開発局建設部河川管理課の

石川伸管理官には本研究の着想を頂きました。応用地質株式会社には十勝川現地観測データの資料整理のご協力を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 河川津波対策検討会：河川への遡上津波対策に関する緊急提言，国土交通省報道発表資料，pp.1,pp.4，2011年8月。
- 2) 北海道開発局土木試験所：現場のための水理学，pp.23-33，1988。
- 3) 中間仁，安芸皎一：物部水理学，岩波書店，1962。
- 4) 栗城稔，末次忠司，小林裕明，田中義人：横越流特性を考慮した破堤氾濫流量公式の検討，土木技術資料，第38巻，第11号，pp.60-61，1996。
- 5) Hiroyasu Yasuda：One-Dimensional Study on Propagation of Tsunami Wave in River Channels，Journal of Hydraulic Engineering，Vol.136，No.2，pp.93-105，2010。
- 6) D.H.PEREGRINE：Long waves on a beach，J. Fluid Mech.，vol.27，part4，pp.815-827，1967。
- 7) 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。
- 8) 国土交通省：美しい山河を守る災害復旧基本方針，参考1-2，2006年6月。
- 9) 吉川泰弘，阿部孝章，平井康幸：越流を考慮した河川津波の一般断面1次元不定流計算，土木学会北海道支部，年次技術研究発表会論文報告集，第68号，2012。（投稿中）
- 10) 阿部孝章，吉川泰弘，安田浩保，平井康幸：2011年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波の北海道内における河川遡上：土木学会，水工学論文集，第56巻，2012。（投稿中）
- 11) Bray,D.：Estimating Average Velocity In Gravel-Bed Rivers，Journal of the Hydraulics Division，Vol.105，No.HY9，pp.1103-1122，1979。