

河川における津波高の 概略値を推定する簡易手法

A DEVELOPMENT OF SIMPLIFIED ESTIMATION METHOD ON APPROXIMATE VALUES FOR TSUNAMI HEIGHT IN RIVER

千葉周二¹・折敷秀雄²・岩瀬浩之³・藤間功司⁴・見延昇⁵
CHIBA Shuuji, OSHIKI Hideo, IWASE Hiroyuki, FUJIMA Koji and MINOBU Noboru

¹(財)国土技術研究センター 調査第一部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

²正会員 工博 (財)国土技術研究センター 調査第一部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

³正会員 博(工) 株式会社エコー 防災・水工部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

⁴正会員 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

⁵前 北海道開発局 帯広開発建設部 池田河川事務所 (〒083-0032 北海道中川郡池田町字利別東町)

This paper presents a method of evaluating seismic performance of river structures in near the estuary zone, using a simplified method for estimating distribution of tsunami height within a river, in which tsunami run-up is predicted at occurrence of an earthquake in under the sea bottom. In the proposed method, an estimating equation is used to easily obtain approximate values for maximum tsunami height and run-up distance from the coastline.

The proposed equation is formulated extracting items sensitive to the approximate values above, by conducting sensitivity analysis applying one-dimensional numerical analysis combining dimensional data of tsunami at estuary and river conditions of areas where tsunami run-up is expected to reach. Criteria such as wave breaking conditions are defined based on experimental results of laboratory studies from published literatures.

Key Words : *Tsunami within river, Estimation of approximate values, Tsunami height and run-up distance*

1. はじめに

本稿では、河川を遡上する津波の最大高と遡上距離の2つの概略値に関する簡易推定式を導出し、河川内の津波高の概略分布を求める方法を提案している。

本方法は、河川構造物の耐震性能照査における外水位として津波高を求める場合の一部に適用される。

なお、河川内の津波高を簡易な方法によって算出することについての既往研究事例には、文末の参考文献安田・渡邊¹⁾や安田²⁾等があるが、波高算出の精度に関連する砕波による波高減衰は考慮されていない。

近年、中央防災会議等において地震被害や津波に関する検討が行われ想定津波高等が公表されている。河川構造物についてもL2地震動に対する耐震性能の照査を行い、所要の対策を講じていくことが急務となっている。

一般に、河川を遡上する津波は、陸上部へと氾濫して行く津波に比べて伝搬速度が速く遡上距離が長くなる特徴を有し、河川内を伝搬する過程で津波先端部は大別し

て以下の2つの形態を呈する。

- ・“砕波段波”・・・津波先端部が砕波しながら段波形状を呈し遡上していく
- ・“波状段波”・・・波長の長い津波先端部が短周期の複数の波に分裂（以下、「ソリトン分裂」という）しながら段波形状を呈し遡上していく

一般に上記の前者の形態を呈する津波の挙動は、非線形長波式を基本式とした解析によって表わされる。

後者の形態を呈する津波では、河口地点に入射してきた津波高が河川内を遡上して行く過程で、ソリトン分裂を伴ってさらに増高して行く事例もあることが知られている。したがって、解析対象河川の河口に来襲してくる津波特性と河川条件によっては、ソリトン分裂の影響を考慮した津波の解析が必要となる場合もある。

ソリトン分裂の影響を考慮した津波の挙動は非線形分散長波式を基本式として、詳細な河川地形を取り入れたモデルを用いた細かい計算間隔での解析が必要となる。

2. 簡易推定手法の目的

国土交通省河川局においては、平成19年3月に「河川構造物の耐震性能照査指針(案)同 解説」(以下、「照査指針」という)を定めた。

照査指針では、「河川構造物の耐震性能の照査において考慮する外水位は、原則として平常時の最高水位とするものとする。」とされている。

ここで、河口部付近にある河川構造物の耐震性能照査には「平常時の最高水位として朔望平均満潮位及び波浪の影響を考慮するものとし、また、地震の発生に伴い津波の遡上が予想される場合には津波高についても考慮するものとする。」とされている。この場合の「津波高の解析に当たっては、原則として非線形長波理論に基づく方程式を用いて平面2次元解析によるものとする。」(以下、「標準的手法」という)とされている。

しかしながら、国内の多くの中小河川においては、詳細な河川地形データ等を整備し、これを用いたモデルを作成し、標準的手法による津波の計算を行うことは困難であり、こうした河川においては、本稿に紹介する「簡易手法の適用条件を考慮の上、河川内の概略の津波高を算出し、耐震性能照査の資料とすることができる。」とされた。

上記のような背景を踏まえて、本研究では、解析対象河川の河口部に中央防災会議等から公表されている津波諸元を与えて、津波が遡上する区間の河川条件に対応した最高津波高及び遡上距離の2つの概略値を推定する簡易推定式を導出し、上記2つの概略値を用いて河川内の概略の津波高分布を求める方法を提案したものである。

3. 簡易推定手法の構築方法

(1) 簡易推定式の導出方法

本研究で提案する手法は、詳細な河川地形等のデータや数値計算などの専門的技術を必要とせず、河口の津波諸元(津波高など)と対象河川の地形的条件(平均的な水深や河床勾配など)から河川内の概略の津波高と遡上距離を手計算で求めることが可能となるようなイメージの簡易な方法を提案することを目標にした。

具体的には、河口での津波諸元を与条件として、河川条件を変化させながら1次元の数値計算によって上記2つの概略値に対する感度分析を行い、相関性の高い項目を抽出する。抽出された項目を用いて上記2つの概略値を簡易に推定する式を導出することとした。

(2) 河川内の津波高に影響を及ぼす諸条件

本研究においては、まず、河川内を遡上して行く津波の最高水位と遡上距離に影響を及ぼすと考えられる河川条件として河口水深、河床勾配、流量、粗度係数、さらには平面形状、河口砂州、河道横断形状、蛇行形状等の項目を取り上げて整理した。

次に、上記諸条件の中から、どの河川においても計算に必要なデータが簡易に得られ、かつ上記2つの概略値の推定に及ぼす影響度が大きいと考えられるものを再抽出して、以下のように整理した。

①河口水深 h_0 ：水深は碎波条件や底面摩擦に影響を及ぼすため、水深が深いと波高減衰が緩慢となり遡上距離も長くなると考えられる。②河床勾配 i ：河床勾配が緩やかだと遡上距離は長くなると考えられる。③流量 Q ：河川流量が大きいと遡上距離は短くなると考えられる。④粗度係数 n ：粗度係数が大きいと急激な波高減衰が生じて遡上距離が短くなると考えられる。

(3) 解析モデル

本研究では簡易推定式の導出に当たり、運動の式として、式(1a)に示した非線形長波式(以下、「分散なし」という)と(1b)に示した非線形分散長波式(以下、「分散あり」という)の2つの基本式を用いた感度分析を行った。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M |M| = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M |M| = \frac{h^2}{3} \frac{\partial^3 M}{\partial t \partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (1b)$$

また、上記2式に対する連続の式は、いずれも(1c)に示した式を用いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1c)$$

ここで、 η は水位(m)、 M は線流量($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)、 h は水深(m)、 D は全水深(m)、 g は重力加速度(m/s^2)、 n はマンニングの粗度係数($\text{s}/\text{m}^{1/3}$)、 ν は渦動粘性係数(m^2/s)である。

なお、碎波の計算および渦動粘性係数の算出は岩瀬ら^{3,4)}の方法にならい、波形ピーク点における流速波速比が0.59を超える条件で碎波と判定し、波形ピーク点の前後の波谷までの区間に対して渦動粘性係数 $\nu = 0.25\sqrt{gD} \cdot \eta$ を算出する手法を用いた。

(4) 碎波形態と計算精度

一般に碎波形態は波の鉛直構造の違いにより以下の3つに大別される。

- ・ 波峰部分から崩れて行く崩れ波碎波
- ・ 波前面の下部から崩れる碎け寄せ波碎波
- ・ 波峰部が前面に飛び出す巻き波碎波

本研究で用いた碎波モデルは、支配方程式の性質上、

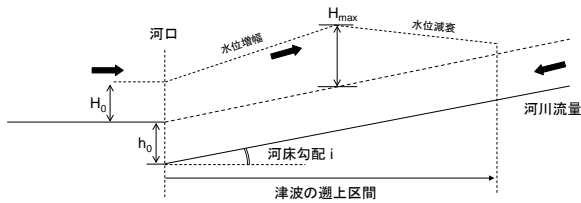


図-1 感度分析モデルのイメージ

表-1 感度分析を行った河川水深 h_0

| 河口水深(h_0)m | 5.0 | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.25 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|------|
| (H_0/h_0) | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.8 |

波高減衰のみに着目し、崩れ波砕波の砕波形態とした。

なお、本解析に用いたモデルの精度は、室田・岩田⁵⁾が長さ30m、幅4mの実験水路で行った段波の砕波に関する水理実験から得た、各砕波形態ごとの最大水位と比較した。この結果、計算値は、崩れ波砕波の実験値にもっとも近く、実験値よりも5~20%程度大きいことを確認した。

4. 感度分析の内容

感度分析は、各要因の影響度を的確に把握するため、できるだけシンプルに、かつ実河川の状況を考慮しながら計算条件と計算ケースを以下のように設定して行った。

(1) 共通条件

感度分析では解析の簡略化のため単位幅辺りの運動の保存則を基礎方程式により解くこととした。

したがって、解析で想定している河川モデルは、一定水深の直線矩形水路で、底面摩擦は土砂河床の河川を想定して全区間にマンニングの粗度係数 $n=0.025$ を与えた。

従って、側面摩擦の影響、横断面形状特性（低水路・高水敷からなる複断面）や河口砂州、中洲、浅瀬等の河床変化に伴う津波挙動への影響は考慮されていない。

また、解析はソリトン分裂波を表現できる解析水準とするため、1mメッシュのモデルとし、計算時間間隔は0.01秒とした。

上記を整理すると以下ようになる。

- 河道の縦断形状は直線の河床勾配とする。
- 河道の横断形状は単位幅、単断面の矩形とする。
- 底面摩擦はマンニングの粗度係数 $n=0.025$ とする。
- 河道の水深は設定した河床勾配およびマンニングの粗度係数から得られる等流水深とする。

(2) 感度分析の計算ケース

感度分析は、以下に示す各諸元を組み合わせた計算ケースについて実施した。

a) 波高水深比 (H_0/h_0)

河口の津波高(H_0)を1.0mに固定し、河口部水深(h_0)との比(H_0/h_0)を表-1及び図-2に示す以下の5ケース

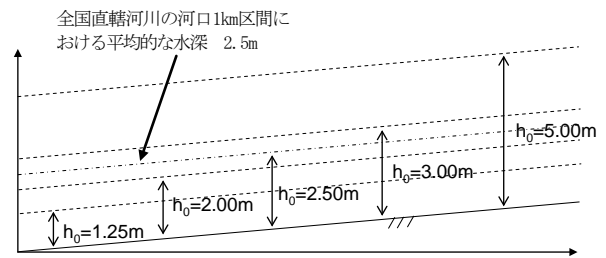


図-2 感度分析を行った河川水深 h_0

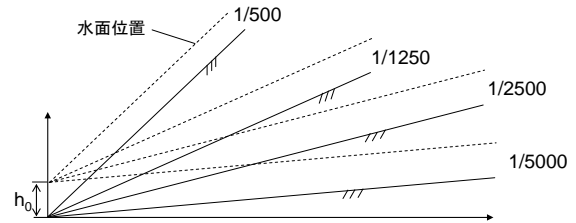


図-3 感度分析を行った河床勾配 i

に設定した。

(参考)

全国の直轄河川の河口から1kmの区間における平均河床高を調べると約T.P. -2.5mであり、T.P. ±0.0mを基準にすれば、水深は2.5mとなる。

b) 河床勾配

河床勾配 i は、図-3に示す 1/5000, 1/2500, 1/1250および1/500の4ケースに設定した。

c) 河川流量

河川流量 Q は、河床勾配 i と底面摩擦および等流水深（設定する河川水深）によって一義的に決定され、底面摩擦の影響はマンニングの粗度係数 n によって評価される。

$$h_0 = \left(\frac{nq}{\sqrt{i}} \right)^{3/5} \quad (2)$$

ここで q は、河川の線流量である。

d) 入射波形と周期

河口に入射する津波波形は、河川への進入前に非線形効果によって十分に前傾化し、波頭部で高周波成分を多く含む波形を想定した。

既往津波の周期 T には、日本海中部地震津波(1983)のように周期が5~10分程度の場合と、10分~40分程度の場合の2種類があることを考慮して5分と30分の2ケースを想定した。

なお、津波の波高(波峰から波底までの高さ)は2.0m(津波高は $H_0=1.0$ m)とし、図-4に示す波形の立ち上がりからピークまでの周期 T_f は20秒の一定値とした。

5. 感度分析の結果と評価

上記の計算条件と計算ケースを設定して実施した結果

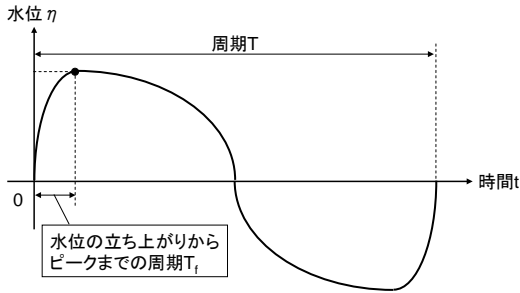


図-4 津波の入射波形

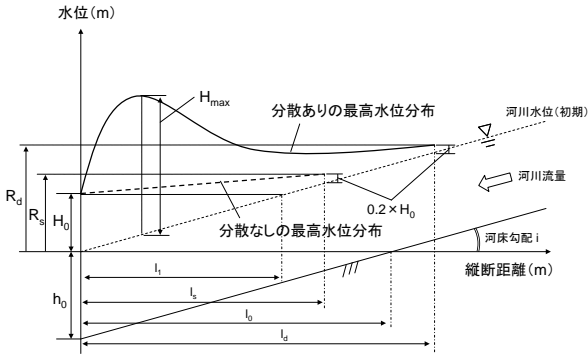


図-5 分析結果の津波諸量の定義

の評価、および簡易推定式導出の要点は以下のとおりである。

(1) 津波諸量の定義と整理方法

分析結果の整理にあたっては、津波諸量を図-5に示すように定義した。

h_0 : 河口水深 (河道の全区間でも、同じ値の等流水深)

H_0 : 河口に入射する津波高

H_{max} : 分散ありの計算における水位分布の最高値

H_{max1} : 分散ありの計算における第1ソリトン分裂波 (以下 第1分裂波という) の水位分布の最高値

l_0 : 河口部の河川水位を水平に延長し河川水位と接するまでの距離

l_s : 分散なしの計算における津波遡上距離 (河川水位から $0.2 \times H_0$ 以上の津波水位が確認された区間)

l_d : 分散ありの計算における津波遡上距離 (河川水位から $0.2 \times H_0$ 以上の津波水位が確認された区間)

(2) 波高水深比 (H_0/h_0) と最高津波高変動比 (H_{max}/H_0)

河川内における最高津波高の変化と河口部における波高水深比との関係を図-6 (入射周期5分) および図-7 (入射周期30分) に示した。上記2つの図から概略以下の事項が分析できた。

(分散ありの計算と分散なしの計算に共通)

- 入射する津波周期の違いによる差は小さい。

(分散なしの計算)

- 最高津波高と河口部の津波高とは、ほぼ等しい。
- 河床勾配による最高津波高の変化はほとんどない。

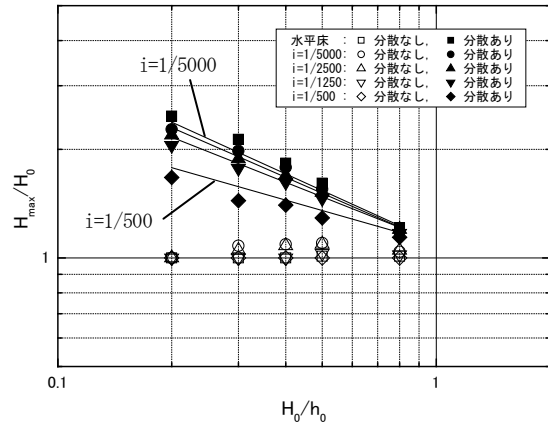


図-6 H_0/h_0 と H_{max}/H_0 の関係 (入射周期 5分)

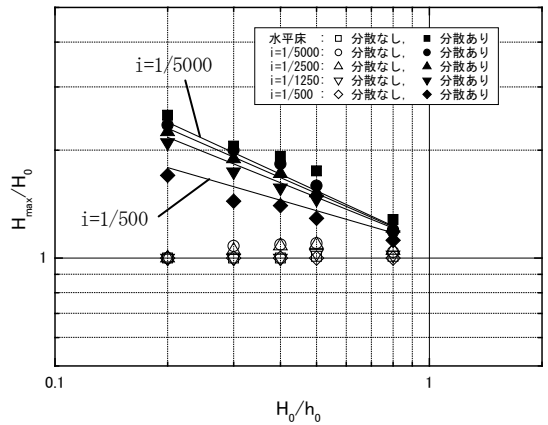


図-7 H_0/h_0 と H_{max}/H_0 の関係 (入射周期30分)

(分散ありの計算)

- 最高津波高は、条件によって河口に入射する津波高の2倍以上になる。
- 河床勾配と (H_{max}/H_0) には高い相関がある。
- 河床勾配が急になると (H_{max}/H_0) は小さくなる。
- (H_0/h_0) が小さくなると (H_{max}/H_0) は大きくなる。

(3) 波高水深比と遡上距離との関係

河川内への津波の遡上距離の変化と河口部における波高水深比との関係を図-8 (入射周期5分) および図-9 (入射周期5分) に示した。

上記2つの図から概略以下の事項が分析できた。

(分散ありの計算と分散なしの計算に共通)

- 入射する津波周期の違いによる差は小さい。

(分散なしの計算)

- 分散ありの計算結果に比較して遡上距離が短くなる。

(分散ありの計算)

- 分散なしの計算結果に比較して遡上距離が長くなる傾向にある。
- 河床勾配が1/5000のケースを除けば、河床勾配の緩急にかかわらず波高水深比と遡上距離には、一定の相関がある。

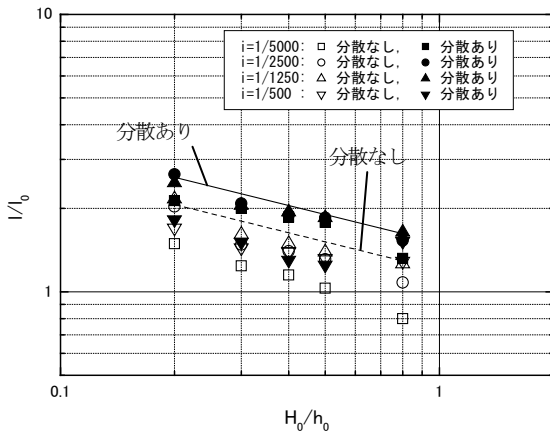


図-8 H_0/h_0 と l/l_0 の関係 (入射周期5分)

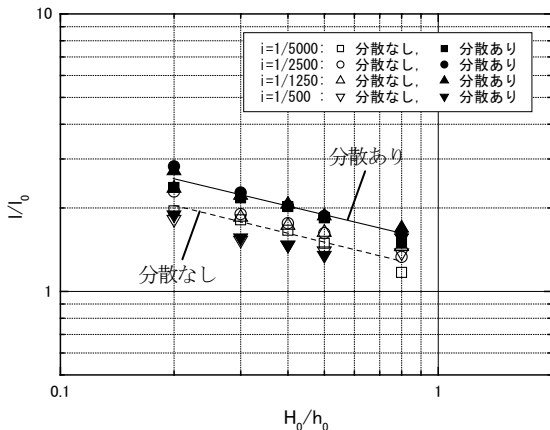


図-9 H_0/h_0 と l/l_0 の関係 (入射周期30分)

上記において、分散なしに比較して分散ありの計算の方が遡上距離が長くなる傾向については、分散ありの計算では分散に伴って、一旦波高が増幅した後に底面摩擦による波高減衰に転じていくことで遡上距離が長くなるものと推測できる。

(4) 河川における最高津波高と遡上距離の2つの概略値を求める簡易推定式

上述の解析結果から、河川内での最高津波高については、最高津波高変動比と河口部の波高水深比との間に回帰式を求め、両者を以下の式で近似することとした。

○分散なしの場合の最高津波高

$$H_{\max} = H_0 \quad (3a)$$

○分散ありの場合の最高津波高

$$H_{\max} = 1.1 \times H_0 \times (H_0/h_0)^{100i-1/2} \quad (3b)$$

なお、図-6および図-7中の各河床勾配に対する実線は、式(3b)を用いて描いたものである。

一方、河川内への津波の遡上距離については、上掲の図-8および図-9における距離比(l/l_0)と河口部の波高水深比(H_0/h_0)との間に回帰式を求め、両者を以下の式で近似することとした。

○分散なしの場合の遡上距離

$$l_s = 1.2 \times l_0 \times (H_0/h_0)^{-1/3} \quad (3c)$$

○分散ありの場合の遡上距離

$$l_d = 1.5 \times l_0 \times (H_0/h_0)^{-1/3} \quad (3d)$$

なお、図-8および図-9中の各河床勾配に対して表示した破線および実線は、式(3c)および式(3d)を用いて描いたものである。ここに、

$$l_0 = H_0 / \tan i \quad (3e)$$

である。

次に、水平床を伝播する孤立破に関する既往の研究では、波高水深比が0.827以上で碎破限界波高となることが理論的に示されている⁶⁾ことなどを勘案して、本式を適用しようとする対象河川の河口における波高水深比(H_0/h_0)によって以下のような取り扱いをすることが可能であると整理した。

- (H_0/h_0) < 0.827・・・分散ありの式を適用
(波状段破となって遡上する可能性がある津波)
- (H_0/h_0) ≥ 0.827・・・分散なしの式を適用
(碎破段破となって遡上する可能性がある津波)

6. 津波高分布の算出と実河川への適用

(1) 河川内の概略の津波高分布を求める方法

上記簡易推定式から得られる最大津波高および遡上距離を用いて、河川内の概略の津波高の分布を以下の方法によって求めることとした。

(分散なしの場合の概略の津波高分布)・・・図-10

- ① P₁点に式(3a)から求めた津波高 $H_{\max-s}$ を設定する。
- ② 式(3c)により (l_s) を求める。
- ③ 河口から l_s 遡上したP₂地点に、推定津波高 ($l_s \times \alpha + 0.2 \times H_0$) を設定する。
- ④ P₁とP₂を直線で結び、その延長線と河川水位が交わる点をP₃とする。
- ⑤ P₁—P₂—P₃の各点を直線で結んだ線を河川内の概略の津波高分布とする。

(分散ありの場合の概略の津波高分布)・・・図-11

- ① P₁の津波高として式(3b)より算出した ($H_{\max-d}$) を設定する。
- ② 式(3d)より算出した (l_d) を求める。
- ③ P₂として河口から 地点における推定津波高 ($l_d \times i + 0.2 \times H_0$) を設定する。
- ④ 河川水位に $H_{\max-d}$ を加えた高さで、P₁から上流へ河床勾配と平行に直線を引く。次にP₂から下流に水平な直線を引き、その交点をP₃として設定する。
- ⑤ P₃から上流に水平な直線を引き、河川水位と交わる点をP₄とする。

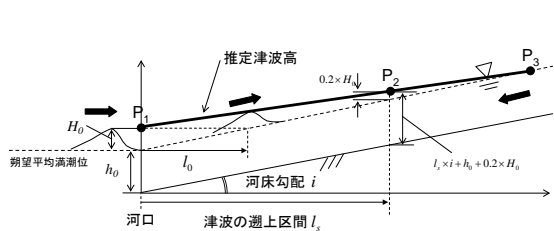


図-10 河川内の概略の津波高分布（分散なし）

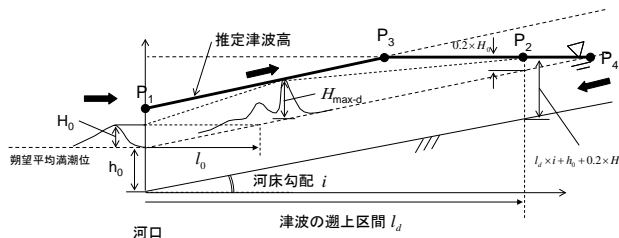


図-11 河川内の概略の津波高分布（分散あり）

⑥ P1-P3-P2-P4の各点を直線で結んだ線を河川内の概略の津波高分布とする。

なお、上記におけるP2点の設定は、分散あり及び分散なしの両者にあつて、本法が概略値推定法であること及び計算の実務性と精度等を考慮して、河川水位+ $(0.2 \times H_0)$ とした。

(2) 実河川への適用

図-12に、2003年十勝沖地震によって発生し十勝川を遡上した津波の河川内の痕跡値⁷⁾と標準的手法による解析結果及び本研究による概略の津波高分布との3者の値を併記して示した。河口から0.8km付近までは、本研究による概略の津波高分布が他の2者の値を包絡するような結果となり、この地点から上流に行くに従い、他の2者の値からの乖離はさらに大きくなっている。

この点については本手法が概略の津波高を推定する簡易な手法として導出されたものであることと、防災対策上で安全側の目安となっているものと捉えて整理したところである。

7. おわりに

本研究の成果は、河川構造物の耐震性能照査において考慮する外水位としての津波高を算出する場合の「津波の河川遡上解析の手引き(案)」の一部に反映されている。

河川を遡上する津波に関しては研究事例も少なく、解析には不明な点も多い。従つて、本稿に紹介した方法によって河川内の概略の津波高分布を推定する場合は、本手法が簡略化、かつ限定された条件でモデル設定を行い解析された経緯を踏まえて、河口周辺区域に津波の挙動に影響を及ぼす特異な地形がないことや解析対象河川の河道形状が複雑でないこと等の条件を備えている河川で限定的に適用できることに留意しなければならない。

なお、平面2次元解析によって津波高の算定を行おうとする河川において、あらかじめ当該河川における概略の最大津波高、遡上距離を本手法によって求めておけば、解析モデル作成範囲の設定などを効率的に行うこともできると考えられる。

本稿に紹介した手法及び図-12に示した標準的手法の詳細は、以下に示す(財)国土技術研究センターのホームページにおいて公開されている「津波の河川遡上解析の手引き(案)」並びにその参考資料を参照されたい。

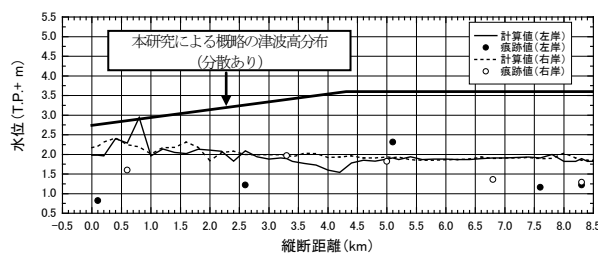


図-12 十勝川における痕跡値、平面2次元計算値および本研による概略の津波高分布との比較

<http://www.jice.or.jp/siryu/index.html>

謝辞：本研究は、国土交通省河川局治水課が(財)国土技術研究センターに設置した「津波の河川遡上に関する検討会」(座長：首藤伸夫 日本大学大学院総合科学研究科教授)において検討された成果の一部を活用してとりまとめたものであり、上記検討会の首藤座長をはじめ関係者に長期にわたって懇切な御指導をいただいたことに対し紙面を借りて深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 第49巻, pp. 20-33, 2005.
- 2) 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, 第50巻, pp. 20-33, 2006.
- 3) 岩瀬浩之, 深澤雅人, 後藤智明: ソリトン分裂の碎破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, pp. 306-310, 2001.
- 4) 岩瀬浩之, 今村文彦: 津波数値計算における碎波モデル, 津波工学研究報告, 第22号, pp. 15-22, 2005.
- 5) 室田明, 岩田好一郎: 段波の変形に関する研究, 土木学会論文集, 第160号, pp. 49-58, 1968.
- 6) Longuet-Higgins, M.S. and Fenton, J.D.: On the mass, momentum, energy and circulation of a solitary wave, Proc. Royal Soc. London, A333, pp.1-13, 1974.
- 7) 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, No768/II-68, pp. 209-218, 2004.

(2008.04.03 受付)