

北上川を対象とした河川遡上津波の数値計算*

東北大大学 工学部 建築・社会環境工学科 青山 恵尚
東北大大学 大学院工学研究科 Mohammad Bagus Adityawan
東北大大学 大学院工学研究科 三戸部 佑太
東北大大学 大学院工学研究科 田中 仁

1. はじめに

2011年3月宮城県沖で発生した東北地方太平洋沖地震津波により河口や河道内に津波が侵入し、堤防を越流し堤内地へ流れ込み、堤内地で多くの被害が生じた。被害を最小限に抑えるためにも河川遡上津波の挙動を解析し、把握することが重要である。津波のように静止状態での水域に入射する波動下においてはその急激な加速効果により規則性波とはまったく異なる特性を示す。津波河川遡上に関する研究は多くなされているが¹⁾、その正確な挙動は未だに明らかになっていない部分が多い。特に本研究では地形が津波遡上に与える影響を調査していく。既往の研究で北上川を対象とした河川遡上津波を実験的に検討しているが²⁾、本研究では北上川を対象として、河口部および河道内の津波の挙動を調査・評価していく。北上川には河口砂州、河口付近の中州、S字河道など特徴的な地形が多くみられる。これらの存在そのものが与える影響も調査・考察していく。

2. 研究方法

(1)研究対象について

本研究の研究対象は北上川（図-1）であり、岩手県および宮城県を流れる一級河川である。北上川は河口部に砂州やS字型河道を有しており津波の河川遡上において、その地形が与える影響は非常に大きく見られる。固定床にて計算を行う。今回は河道の両端に津波が超えることのない高さの鉛直な壁を設置すると仮定して、この条件のなかでの挙動を調査していく。2011年の東北太平洋地震では河道内から津波が堤防を越流し堤内地に被害をもたらしたため、津波が河道内から外に出ることのない条件での河川遡上津波の挙動について調査・考察するためである。

入力波としては実際の津波と波形は異なるが、単純な波形のもの（図-2）を採用する。最大波高はcase1として東北太平洋沖地震、case2としてL1津波と東北太平洋沖地震の中間波をそれぞれ模擬している。case2の中間波は実際には存在しないが、「仮想の施設建設上想定内の波」として用いている。

*Numerical simulation of run up tsunami in the model of Kitakami River, by Aoyama Yasuhisa, Mohammad Bagus Adityawan, Mitobe Yuta, and Tanaka Hitishi

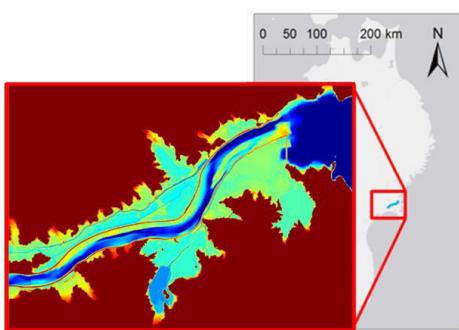


図-1 研究対象、北上川

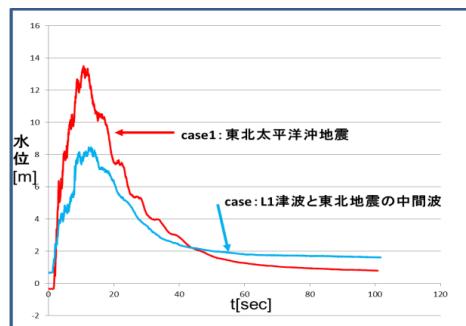


図-2 入力波

(2)シミュレーションについて

計算方法は二次元浅水流方程式モデルを用いて、McCormack 法^{3), 4)}により離散的に解く。

$$\text{連続式} : \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$\text{運動方程式} : \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + gh \frac{\partial(h+z)}{\partial x} = -ghS_{fx} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + gh \frac{\partial(h+z)}{\partial y} = -ghS_{fy} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$S_{fx} = n^2 u (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} / h^3 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (4)$$

$$S_{fy} = n^2 v (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} / h^3 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5)$$

h は水深[m], u は x 方向の速度[m/s], v は y 方向の速度[m/s], t は時間[s], g は重力加速度[m/s²], S_{fx} は x 方向の摩擦勾配, S_{fy} は y 方向の摩擦勾配, z は地盤高[m], n はマニングの粗度係数をそれぞれ表す。McCormack 法にて、空間差分を用いる。予測子段階では上流方向に向かって、修正子段階では下流方向に向かって空間差分を用いる。10m メッシュで北上川河口 9kp を含む 10km*8km を含む範囲（図-3）で計算している。計算条件として、地形データは海域では日本水路協会から海底地形デジタルデータ、河道内では東北太平洋沖地震前の定期横断測量結果にそれぞれ基づき、地震による地盤沈降量を考慮したものを用いている。マニングの粗度係数は海域 0.025 陸域 0.03, 境界条件は、右側は入力要件であり、左側は初期水位の鉛直な壁があり、その壁以下の水位の水は跳ね返り、それ以上の水位の水は開放条件で流れ出るように設定している。

また本研究では、簡易的な条件として津波が超えることのない高さの鉛直な壁を河道の両端に設置して（図-4）考察を行う。津波が河道の外に漏れることのない条件での、河道内の津波遡上の挙動を調査・考察していく。

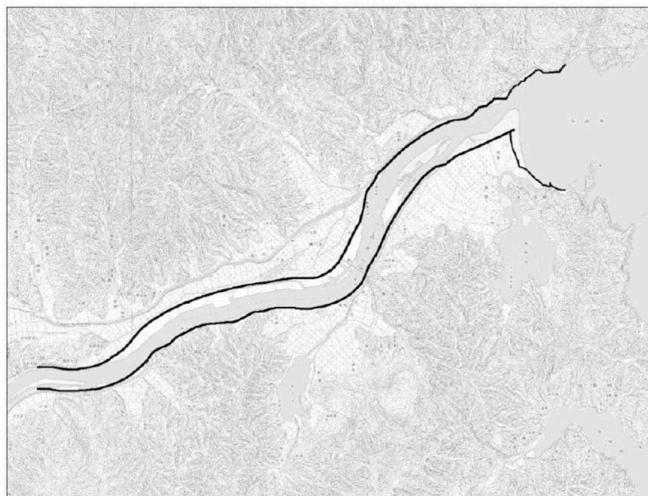
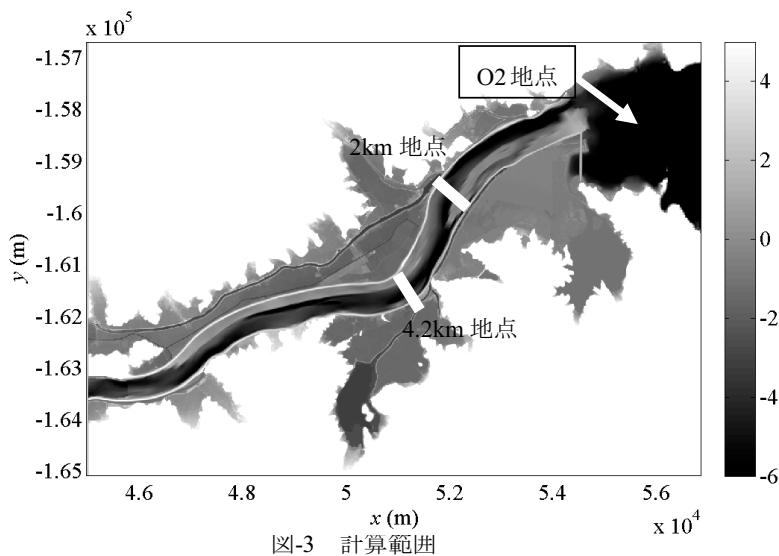


図-4 鉛直堤防設置

(3) 実験について

本研究では実際の津波の測定がなされていなく測定値がないことや、仮想の津波を想定しているため、実験での測定値を計算値と比較してモデルの再現性の検討を行う。国土技術政策総合研究所で行われた北上川河口津波遡上実験の測定値を用いる。スケールは 1/330、計算範囲や計算条件はモデルと同様に設定している。この段階にて実際の津波の複雑な波形を再現することが困難なため単純な波形にて代用している。

3. 結果および考察

(1) 遷上速度について

各 case の時間毎の津波到達点を図示する (図-5, 図-6)。河口部では津波の規模、最大水位による遷上スピードの違いはないことが示される。河道の 2.5km 地点ほどからは規模の大きい津波の方が遷上スピードが大きくなっている。これはエネルギーの減衰により、大きい津波ではまだエネルギーが消失されずにいて、規模の小さい津波ではほとんどのエネルギーが消失されて遷上スピードが小さくなっているためと考察できる。また、河口部の急激に川幅が狭くなる地点で河口砂州や河口の壁にぶつかって津波の勢いが減衰される。津波の規模が大きいほうが河口部の堤防の影響を大きく受けている。

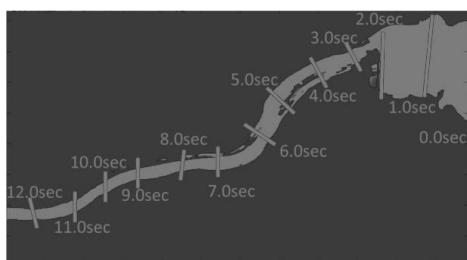


図-5 case1 の時間毎の津波到達点

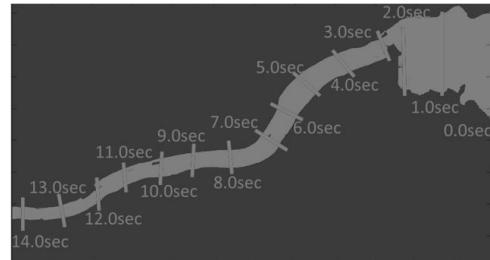


図-6 case2 の時間毎の津波到達点

(2) 水位について

下に各計測地点での水位変化を示す (図-7, 図-8, 図-9)。水位 $\eta = h + z[m]$ と定義する。

また誤差についても以下の定義のもと議論を進めていく。

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N \frac{(\eta_{cal,i} - \eta_{exp,i})^2}{(\eta_{exp,i})^2}} * 100 \text{ (%) } \dots \dots \dots \quad (6)$$

s は誤差(%)、 N は時間ステップの総数、 $\eta_{cal,i}$ は計算値の水位、 $\eta_{exp,i}$ は実験値の水位をそれぞれ表す。時間ステップは津波により水位が上昇し始める時間から、 $t=120[\text{sec}]$ の範囲で計算する。

- ・ 地点 O2

地点 O2 は海域の一地点であり、津波が河川に流入していく前の地点である。誤差は case1 にて $s=25.5\%$ 、case2 にて $s=6.4\%$ となっていて case2 においては再現性は高いものとなっている。case1 にて計算が過大評価をしているのは、反射を過剰に計算しているためであると思われる。河道に侵入する前なので、津波の減衰は起こっていない。

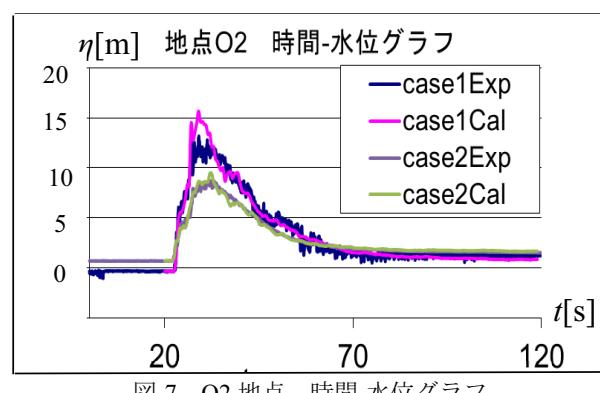


図-7 O2 地点、時間-水位グラフ

・2km 地点

2km 地点は、河道に津波が侵入し、S 字形の曲がり始める直前の部分である。

誤差は case1 右岸で $s=50.0\%$ 、case2 左岸で $s=14.4\%$ となっている。case1 右岸で誤差が大きいのは実験値の方で落ち着いた後の水位が約 4m で一定となるという不自然な値をとっているためである。これは水位計の誤作動によるものと思われ、その部分を除くと誤差は $s=7.3\%$ となる。再現できていないのは波の非定常性を考慮していないためであると考えられる。この地点では、河口部での津波の河道への入射による減衰を受けた後の地点である。最大水位を比べると case1 では 12.89m から 8.84m（約 31.4% 減少）へと、case2 では 8.46m から 6.19m（約 26.8% の減少）へと小さくなっている。規模の大きい津波のほうが河口部分の影響は大きく受けることが分かる。

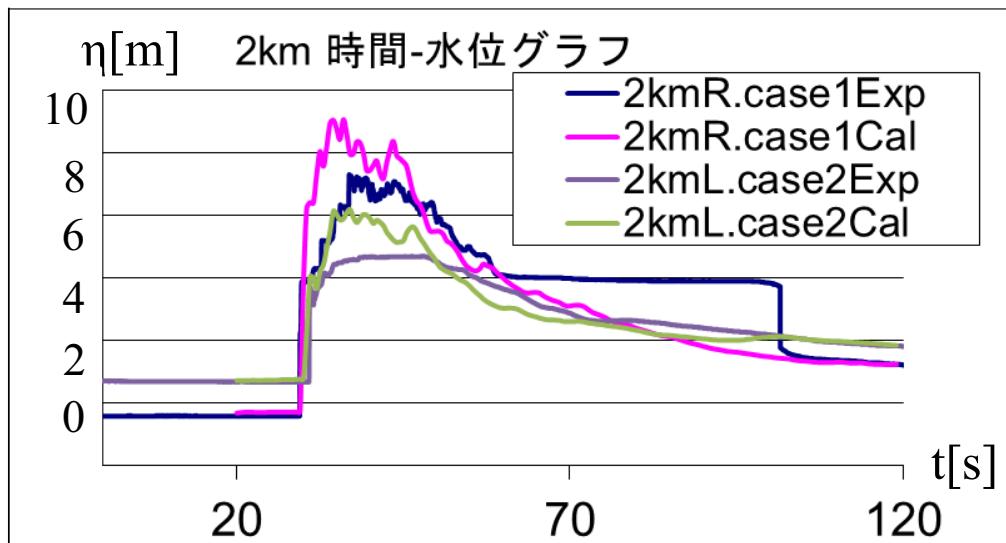


図-8 2km 地点、時間-水位グラフ

・4.2km 地点

4.2km 地点は S 字河道の一つ目の曲がり部分を通過した後の地点である。

誤差は case1 右岸で $s=30.3\%$ 、case2 左岸で $s=15.3\%$ となっている。case1 右岸のほうで、誤差が大きいものとなっていて、全体的に過大評価している。計算値と実験値の差については同様に波に非定常性を考慮していないことや実験での表面張力の影響を適切に考慮できていないことが原因として挙げられる。また、S 字河道の曲がり部分の影響を受けて、津波が減衰し最大水位が減少している。2km 地点と比べると case1 では 7.28m から 6.28m へと（約 12.4% 減少）、case2 では 4.69m から約 4.21m へと（約 10.2% 減少）している。比較すると規模の大きい津波のほうが曲がった河道の影響を受けやすいといえる。

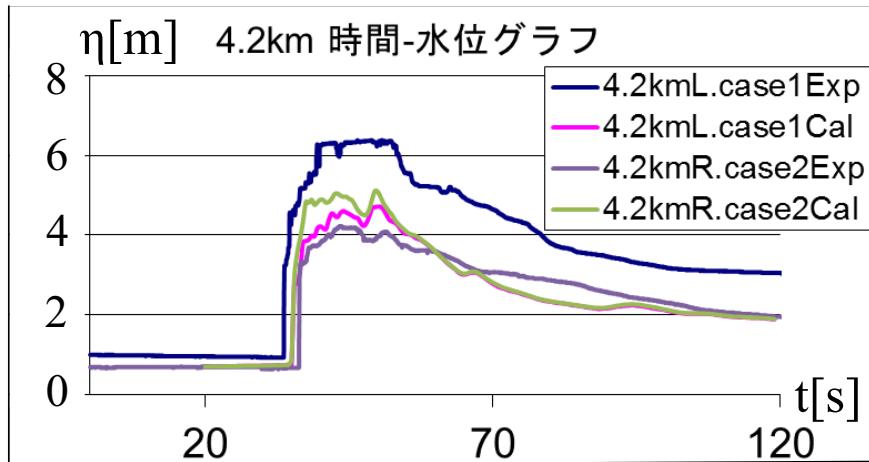


図-9 4.2km 地点, 時間-水位グラフ

4. おわりに

本研究では、北上川を対象とし浅水流方程式モデルを用いて津波の河川遡上における地形による影響を調査した。北上川における浅水流方程式の再現性を確かめることができた部分がある。計算値と実験値の差は波の非定常性を考慮していないためであるといえる。また、堤防を超えることのない規模の津波では、最大水位の大きい津波のほうが河口部や河道の曲がりによる減衰を大きく受けることが示された。

謝辞：本研究で使用した水理実験データは国土技術政策総合研究所河川研究室より提供を受けたものである。また、本研究は国土交通省河川砂防技術研究開発の助成を受けて実施された。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 村嶋陽一, 越村俊一, 岡 秀行, 村田泰洋, 今村文彦: 非線形理論に基づく実用的な津波の河川遡上モデルの開発, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.201-205, 2010.
- 2) 福島雅紀, 松浦達郎, 服部 敦: 河川津波の特性把握に関する実験的検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_261-I_265, 2013.
- 3) M.S.B. Kusuma, M.B. Adityawan, and M. Farid: Modeling two dimension inundation flow generated by tsunami propagation in Banda Aceh City, *International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation*, pp.407-414, 2008.
- 4) S.A. Yost, P. Rao: A non-linear filter for one- and two-dimensional open channel flows with shocks, *Advances in Water Resources*, 24, pp.87-193, 2001.