

河川遡上津波の数値計算精度に堤防越流が与える影響*

東北大大学院環境科学研究科 青山 恭尚
東北大大学院工学研究科 三戸部 佑太
東北大大学院環境科学研究科 小森 大輔
東北大大学院工学研究科 田中 仁

1. はじめに

2011年3月宮城県沖で東北地方太平洋沖地震津波が発生した。この地震は日本最大規模のMw. 9.0であり、長周期の巨大な津波を発生させ、沿岸域で大きな人的被害や物的被害が発生した。一方、海域を伝播した津波が河川を遡上して堤防を越流し堤内地へと浸水したことによる被害も発生している。河川を遡上する津波は、沿岸から陸上を遡上していく津波を比較しても、到達時間が早く遡上距離が長い、河川や津波の条件によっては水位が急激に上昇する可能性がある¹⁾、という特徴を有しているため他の沿岸部よりも浸水による被害は大きくなる。被害を最小限にとどめるためにも河川を遡上する津波の挙動を把握し正確に予測することは重要である。

過去にも津波に関する研究は数多くなされている。海域での津波数値計算では、津波の長周期かつ長波長の波であるという特徴を前提とし浅水流の仮定を用いて再現計算を行っている。この仮定を用いての海域の再現計算では良い精度の近似ができている²⁾。一方、河川に津波が浸入すると、河口部の急縮部や河道の曲がりなどによる影響が発生し海域での津波の挙動とは別の挙動を示す。河道での津波遡上の再現計算は流れの三次元性を考慮した研究などがなされている³⁾。また、巨大津波の場合では河川堤防を津波が越流するので、堤防の越流現象も正確に再現する必要がある。過去にも堤防を越流する津波についての研究はなされているが⁴⁾、曲がりや急縮部などの河道地形と堤防越流を考慮した研究は少ない。河川遡上津波に関して、河道の曲がりや堤防越流が河川遡上津波の数値計算にどのように影響を与えるかを検討する。

河川遡上津波の数値計算に関する研究の問題点として実在痕跡が数少ないことが挙げられる。巨大津波の際には河川全体で大きな水位上昇が起り、特に河口部や下流地域では構造物の高さを大きく越える高さの水位上昇が起こる。よって痕跡高は残らないことが多く、津波後の検証が困難であるという問題がある。そこで本研究では、国土技術開発総合研究所にて行われた模型再現実験のデータを用いた。これにより現地データでは十分に得ることのできない、水位の時系列データの入手が可能となった。

本研究では、平面二次元での河川形状と河川堤防が河川遡上津波の数値計算精度に与える影響を把握することを目的とし、再現計算を行い模型実験で得られたデータとの比較を行った。

*The effect to numerical simulation accuracy of run up tsunami by overflow of embankment, by Aoyama Yasuhisa, Mitobe Yuta, Komori Daisuke, and Tanaka Hitishi

2. 研究対象と研究方法

(1) 研究対象について

研究対象は岩手県南部と宮城県北部を流れる一級河川の北上川である。本研究では河口部から上流 10km までを含む領域を対象とする（図-1）。2011 年東北地方太平洋沖地震津波では堤防高を大きく越える津波水位が来襲し河道内でも堤防決壊が生じた。

(2) 対象とする実験の概要

模型実験では追波湾の一部を含む北上川下流 10km を含む範囲で河道と周辺地形を 1/330 のスケールで再現したものである。模型の概要と水位の計測地点を示す（図-2）。実験装置の追波湾の沖側で造波装置により津波の模擬波を起こしている。造波装置の関係により用いる津波波

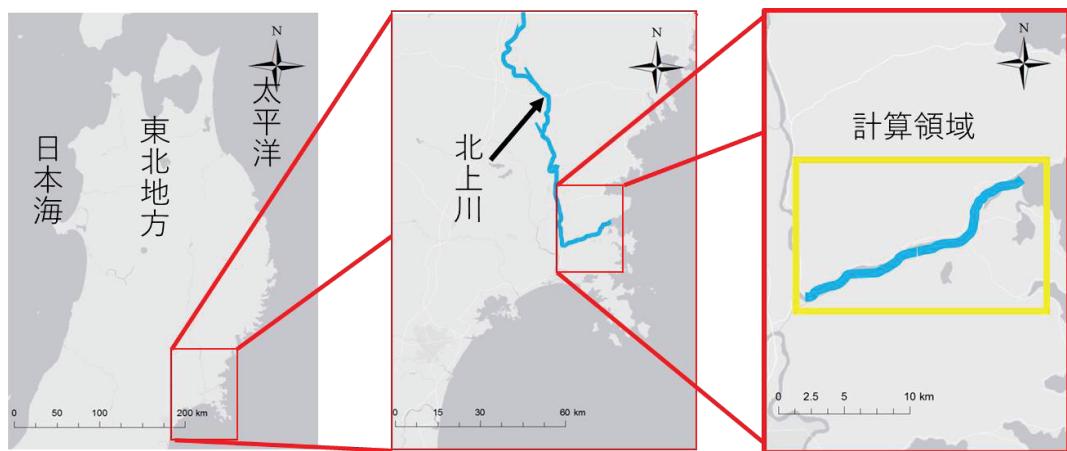


図-1 研究対象-北上川

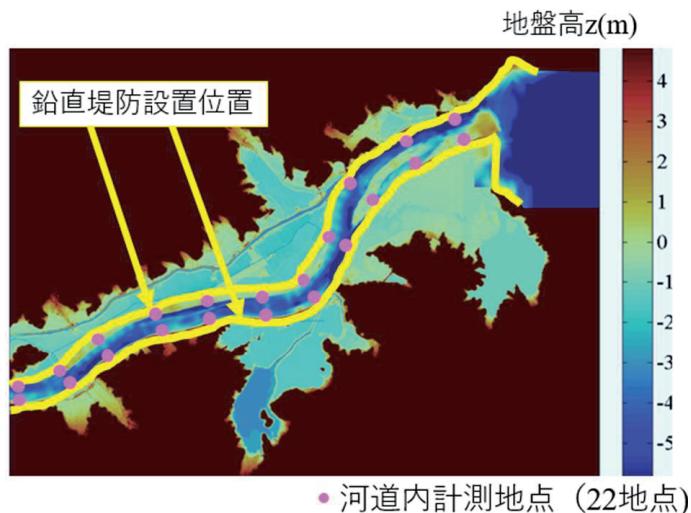


図-2 模型概要、河道内水位計測点

形は実在津波とは異なる単純波形のものを使用する（図-3）。入力波1として2011年東北地方太平洋沖地震津波に相当する規模のLevel 2津波を入力波として用いる。

スケールの違いによる水の表面張力や粘性の働き方の違い、造波装置による津波波形の違い、現地地形と模型地形の相違点といったような、現実津波とは異なる部分は生じるが水理現象としての類似点を取り上げて比較することは可能であるといえる。

(3) 計算方法

浅水流方程式モデルを用いて固定床で計算を行う。

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

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

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

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

$$S_{fy} = n^2 v (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} / h^{\frac{4}{3}} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5)$$

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。離散化手法としてMc Cormack 法⁵⁾を用いて、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行う。10m メッシュにて計算をしている。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用いている。マニングの粗度係数は 0.03、境界条件は、右側は入力条件であり、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。

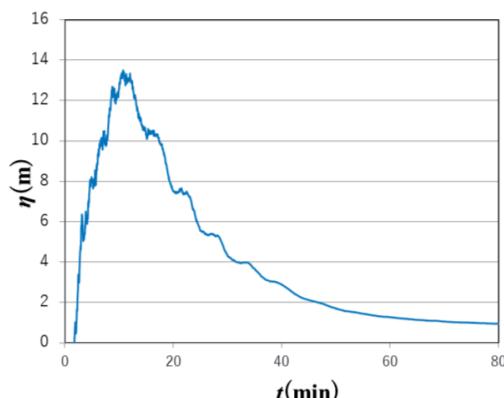


図-3 入力波形

(4) 検討ケースについて

河川遡上津波の数値計算に対して堤防条件、入力津波の規模が与える影響を調べるために4ケースを検討する。表-1に検討ケースについて示した。Case 1では堤防越流がない条件での再現計算をしている。河道の両端に津波の水位が越えることのない鉛直な堤防を設置している(図-2)。Case 2では下流部を現況堤防、上流部を津波水位の越えることのない鉛直堤防を設置している。詳細な地形データを図-4に示す。現況堤防と十分に高い鉛直堤防の境界としては、越流水深が1.98mより大きいか小さいかを基準としている。

3. 結果・考察

以降、比較のために η (水位) = h (水深) + z (地盤高) を定義する。また、誤差の評価方法として RMS 値 e を用いる。対象時間は水位上昇時点から計算終了の $t=6000(\text{sec})$ である。以降、現地スケールにて示す。

(1) 水位時系列比較

図-5に二つのケースの河道内の水位時系列を示す。計算精度を見ると、越流なしの条件では下流の1kL地点で $e=0.46(\text{m})$ 、中流の5kR地点で $e=0.24(\text{m})$ 、上流の9kR地点で $e=0.26(\text{m})$ となっている。それぞれ最大水位の10%以内に収まっており、比較的良好に再現できている。一方、越流ありの条件での RMS 値は下流の1kL地点で $e=0.74(\text{m})$ 、中流の5kR地点で $e=0.67(\text{m})$ 、上流の9kR地点で $e=0.94(\text{m})$ となっている。越流なしのケースと比較すると RMS 値が大きくなっ

表-1 検討ケース

Case名	堤防条件	詳細
Case 1	越流なし	河道の両端に鉛直堤防設置
Case 2	越流なし	下流は現況・上流は鉛直堤防

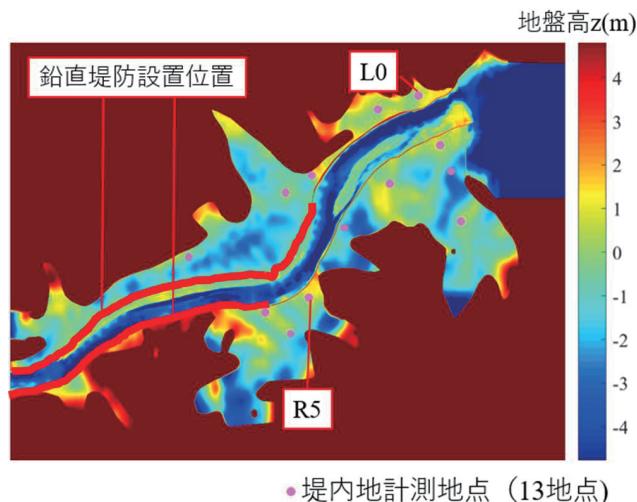


図-4 Case 2 地形条件

ている。特に最大水位が小さい上流地点での RMS 値が大きくなつておき再現性は低いといえる。これは、下流・中流部での越流する流量や流れ場を正確に再現できずにその誤差が上流のほうで表れていると思われる。ケース別での同地点の最大水位を比較すると、越流の影響により河道内の最大水位が減少する現象を計算モデルでも再現できている。堤内地を見ると(図-6)，波形や最大水位が再現できていない。堤内地が過大評価であり、河道上流部が過小評価となつてゐる。越流量を実験よりも大きく再現している。RMS 値を河道内と比較すると、下流では隣接した地点でも堤内地のほうが大きくなつてゐる。越流現象を再現方法や、堤内地での津波伝播を正確に再現するには改善が必要である。

(2) 浸水範囲

図-7 に $t = 740(\text{sec})$ での水位と流速の分布を示す。津波が来襲し波が遡上していく先端では、流速が大きくなつてゐる。その時に多量の水が越流している。左岸側では下流のほうで越流した津波が堤内地を伝播して氾濫している。左岸下流部の越流地点では図の左方向に、右岸中流部の越流地点では図の下方向に流速を持ち、堤内地では越流地点の流速方向と同じ向きに流速を持つてゐる。

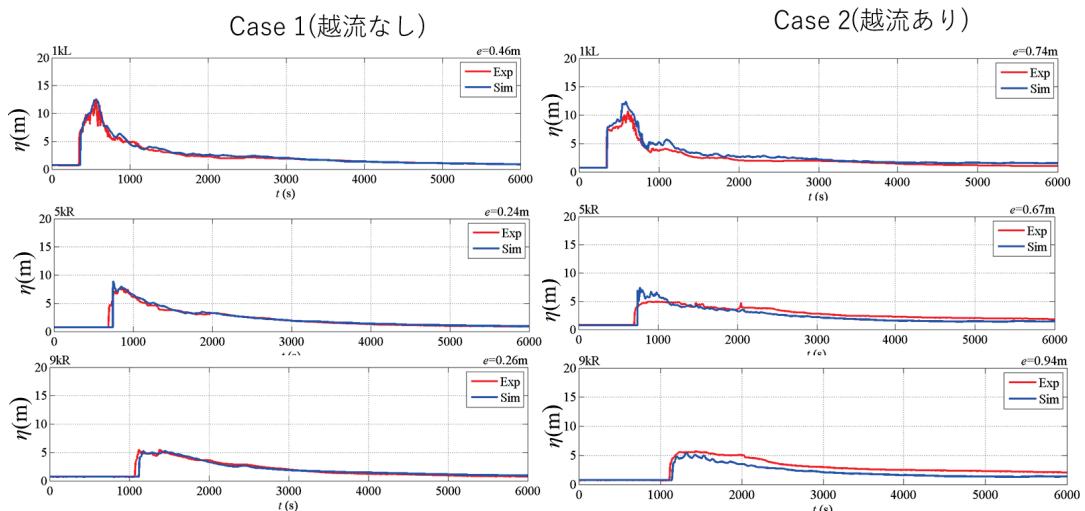


図-5 水位時系列（河道内）

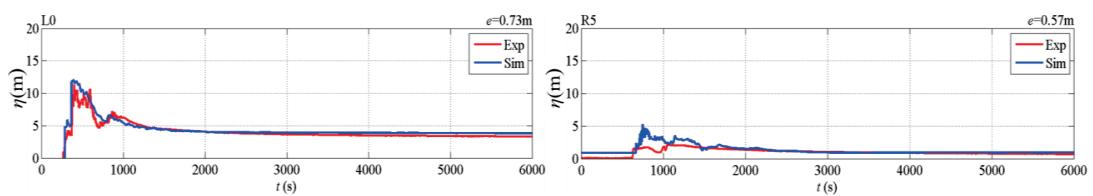


図-6 水位時系列（堤内地）

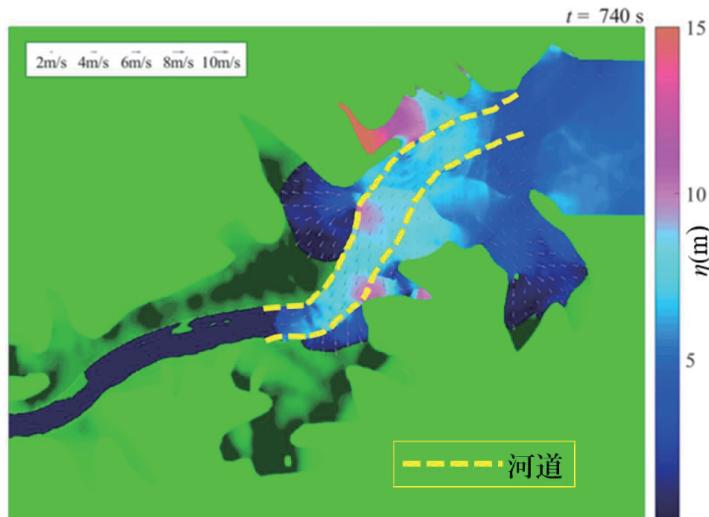


図-7 水位分布と流速分布

4. 結論

河川形状と堤防条件が津波遡上計算精度に与える影響を検証した。越流ありの条件では河道内の水位減少を計算においても確認することができた。越流流量などを正確に再現できていなく、堤内地では過大評価、河道上流では過小評価となっており、特に堤内地での RMS 値が大きくなっている。

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) 折敷秀雄, 千葉周二, 岩瀬浩之, 藤間功司, 松井幸一: 米代川における 1983 年日本海中部地震の再現計算と解析上の課題, 海岸工学論文集, Vol.55, pp.241-245, 2008.
- 2) 津久井啓介, 藤澤康雄, 後藤智明: 南海トラフにおける津波特性に関する考察, 海岸工学論文集, Vol.44, pp.336-340, 1997.
- 3) 松井大生, 内田龍彦, 中村賢人, 服部敦, 福岡捷二: 非静水圧準三次元計算による北上川の津波河川遡上・氾濫流の一体解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_181-I_186, 2015.
- 4) 池澤広貴, 下園武範, 佐藤慎司: 非静水圧を考慮した鉛直積分型堤防越流モデルの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, I_7-I_12, 2015.
- 5) Kusuma, M. S. B., Adityawan, M. B. and Farid, M.: 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.