

# 堤防決壊が津波の河川遡上へ与える影響に関する実験的検討

## EXPERIMENTS ON THE EFFECTS OF RIVER LEVEE BREACHES ON TSUNAMI RUN-UP IN RIVER

中村賢人<sup>1</sup>・笹岡信吾<sup>2</sup>・森 啓年<sup>3</sup>・服部 敦<sup>4</sup>

Kento NAKAMURA, Shingo SASAOKA, Hirotooshi MORI and Atsushi HATTORI

<sup>1</sup>正会員 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

<sup>2</sup>非会員 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室

<sup>3</sup>正会員 博士 (工学) 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室

<sup>4</sup>正会員 博士 (工学) 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室

Serious damage was caused by tsunami run-up in river in the Great East Japan Earthquake. A large scale experiment modeled Kitakami River was carried out to clarify the effect of river levee breaches caused by the tsunami. The run-up height and speed were compared. As the result, the river levee breach would lower the run-up height and speed of upper stream of the river. These trends could be represented by the numerical simulation using the nonlinear long wave theory.

**Key Words :** river levee breach, tsunami run-up in river, model experiment, numerical simulation

### 1. はじめに

#### (1) 背景

東日本大震災に伴う津波の河川遡上(以下、河川津波と呼ぶ)では、河川水位の自記観測上初めて堤防高を超える水位となり、北上川においては遡上距離も河口から約50kpと長区間となった。そのような中、河川津波対策検討会によって「河川への遡上津波対策に関する緊急提言」<sup>1)</sup>(平成23年8月22日)がとりまとめられた。これを受け国土交通省は河川津波対策を推進しており<sup>2)</sup>、国土技術政策総合研究所では河川津波の水理現象の研究を行うために、河川津波が観測された北上川において湾口から10kpまでの河道内と周辺地形の縮尺1/330模型を作成し、堤防状況・河道内地形・河川流量をそれぞれ変化させた水理模型実験を実施し、結果を比較することによって河川津波の特性を研究している。また、それらの実験の再現解析を河川津波解析の手引きである「津波の浸水想定設定の手引き」<sup>3)</sup>(以下、手引きと呼ぶ)によって実施し、再現性を確認している。

#### (2) 目的

手引きにおいて、予測解析では基本的に津波が堤防を

越流すると同時に堤防が地盤高まで決壊するものとして取扱うとある。これは、浸水対策検討においては生じうる最大規模の浸水深を用いることが妥当とするという考え方に基づいて設定されたものであると解される。この考え方を重視すると、河川津波の場合、上記設定では堤内地への浸水量が増加することで河川津波の遡上量が減少してしまい、上流側の津波の河川遡上最高水位(以下、最高水位と呼ぶ)を低く、また津波の到達速度(以下、到達速度と呼ぶ)を遅く見積もることが懸念される。そのような中、本研究では堤防状況として堤防位置に壁を立て越流が生じない壁立堤防、東日本大震災時の堤防を再現し越流は生じるが堤防は残る再現堤防、東日本大震災時の堤防決壊箇所を決壊させた条件の3条件によって堤防模型を作成し、実験によって堤防状況が最高水位及び到達速度へ与える影響を把握することを目的に実施した。

#### (3) 既往研究

河川津波解析の手引きは「津波の浸水想定設定の手引き」であり、この基準の中の参考資料として「津波の河川遡上解析の手引き(案)」<sup>4)</sup>があげられ、両者ともに非線形長波理論または非線形分散長波理論による平面二次元解析を原則としている。

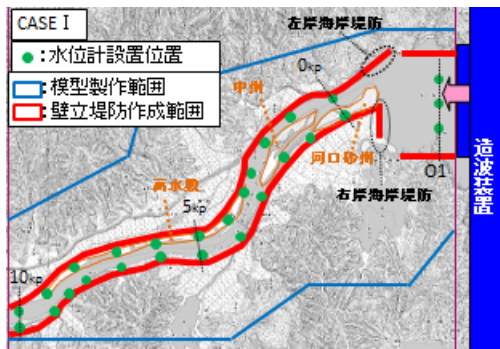


図-1 CASE I 模型概略図

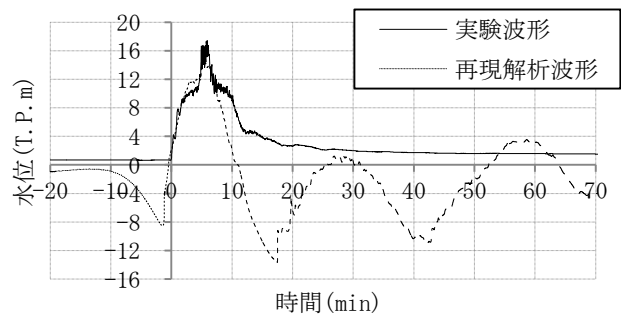


図-2 実験及び再現解析波形時系列水位図

手引きにおいて、河口砂洲は津波の挙動を大きく左右する要因の一つのため、フラッシュされ易い場合には河口砂洲を除去した地形データにて計算を実施する旨が記述されている。これについて田中ら<sup>5)</sup>によって2010年チリ地震に伴う津波来襲時の実測水位データによる検討、福島ら<sup>6)</sup>によって実験模型を用いた検討が実施されており、特に河口砂洲等の河口付近河道内地形が最高水位を減勢させる効果があることが確認され、手引きの懸念を裏付けるものとなった。また、河川域の初期水位は予測計算においては平水流量により算出した河川水位と記述されている。これについて著者ら<sup>7)</sup>によって河川流量を供給した実験は供給しない実験よりも最高水位が高い値となり、手引きによる再現解析によっても同様の傾向となることが確認された。

一方、前述の通り、手引きによる再現解析は非線形長波理論または非線形分散長波理論による平面二次元解析を原則としているが、異なる手法による研究も進められている。松井ら<sup>8)</sup>は平面二次元解析の枠組みで流速と圧力の鉛直分布を考慮できる一般底面流速解析法を津波解析に応用するため、非静水圧津波準三次元解析法を開発した。その手法を用いて縮尺模型及び東日本大震災時の痕跡水位等と比較し、再現性をそれぞれ確認した。

上記の様な研究が進められる中、本研究の様に、堤防状況によって津波の最高水位及び到達速度を検討した実施した研究はほとんどない。

## 2. 実験の方法

### (1) 実験模型の作成

北上川を対象に図-1に示す範囲にて湾口から10kpまでの河道内と周辺地形の縮尺1/330 (長さ33m, 幅30m, 深さ0.5m) 模型を製作した。河道内地形は河口砂洲を-1.0~0.7kp, 中州を0.5~2.7kp, 高水敷を3.1~9.1kpに設置し、堤防は津波発生年の直近 (平成21年度) に測量された形状 (以下、再現堤防と呼ぶ), 初期水位は朔望平均満潮位のT.P.+0.703mとした。模型はManningの粗度係数が現地換算値にて0.03となるようモルタルにて作成した固定床である。

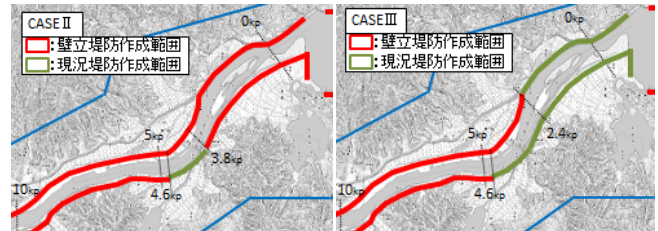


図-3 CASE II 模型概略図

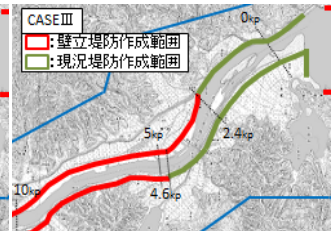


図-4 CASE III 模型概略図

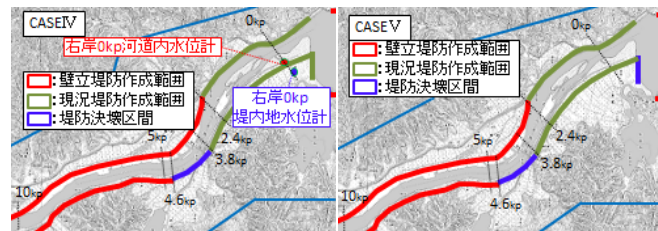


図-5 CASE IV 模型概略図

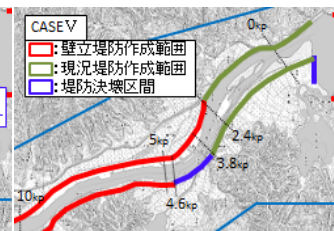


図-6 CASE V 模型概略図

### (2) 入力波の設定

東日本大震災時に北上川へ襲来した津波を震源断層モデルより求め (以下、再現解析波形), 第一波目の最大水位及び周期を模型下流端に設置されている造波装置にて再現し (以下、実験波形と呼ぶ), 模型へ与えた, 図-1のO1に示す湾口部3箇所における時系列水位平均値を実験波形として, 再現解析波形と実験波形の時系列水位図を図-2に示す。以降の値はすべて現地換算値により整理した。

### (3) 実験ケース・測定項目

実験ケースは図-1, 図-3~図-6に示す通り, 各ケースの海岸堤防も含めた堤防状況の条件に応じて, 計5ケースを設定した。また, 河道内地形設置位置及び水位観測地点 (発生した津波による水位変化を, 0~10kpの河道部24箇所, -3~0kpの湾口部3箇所において水位計により計測) を併せて記載した。

東日本大震災時の津波による被害が特に大きかった左岸の海岸堤防~2.4kp, 右岸3.8~4.6kp及び右岸海岸堤防に着目し, その区間及びその下流区間における堤防状況を①再現堤防表法肩の位置に壁を設置 (以下, 壁立堤防と呼ぶ), ②再現堤防, ③堤防を撤去した決壊の3条件に変化させた。具体的な堤防の条件は, CASE IIでは右

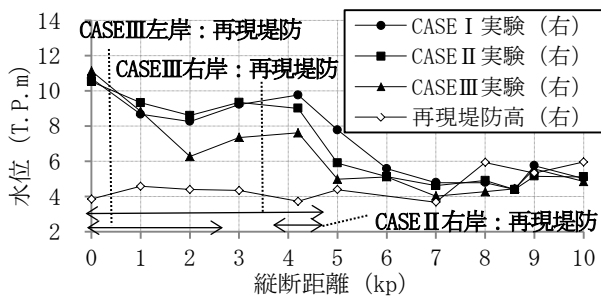


図-7 CASE I～III 実験最高水位縦断面図 (右岸)

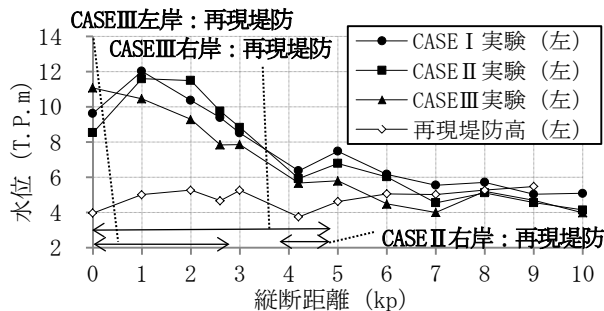


図-8 CASE I～III 実験最高水位縦断面図 (左岸)

岸の3.8～4.6kpのみ再現堤防を設置し、他は壁立堤防とした。CASE IIIでは再現堤防を右岸の海岸堤防～4.6kp、左岸の海岸堤防～2.4kpへ設置し、他は壁立堤防とした。CASE VではCASE IVから右岸海岸堤防をあらかじめ決壊させたものとし、あわせて5条件を設定した。なお、壁立堤防はベニヤ板、再現堤防はモルタルにて作成しているため、実験中に堤防状況が変化しない構造としている。

また、実験中は模型上空に設置されたビデオカメラ2台にて、模型下流側(湾口～3kp)及び模型中流・上流側(3～10kp)の範囲をそれぞれ撮影し、現地換算値にて湾口部水位計O1(図-1)に津波が到達してから3分毎の津波先端位置を図化(以下、津波先端図と呼ぶ)し、各ケースの到達速度を比較する流況観察を実施した。ただし、模型下流側の範囲においては参考として湾口部水位計O1に津波が到達してから1.5分後も記載した。

### 3. 堤防状況が与える影響に関する実験的検討

#### (1) 越流区間

##### a) 水位計測

越流区間が最高水位に与える影響を比較するため、CASE I～IIIにおける各地点の最高水位をプロットした縦断面図について、右岸を図-7、左岸を図-8にそれぞれ示す。

堤防を全て壁立としたCASE Iと、右岸の3.8～4.6kpのみ再現堤防、他は壁立堤防を設置したCASE IIを比較したとき、CASE IIは再現堤防区間を含め、その上流の最高水位は左右岸ともに低くなる傾向があった。具体的に

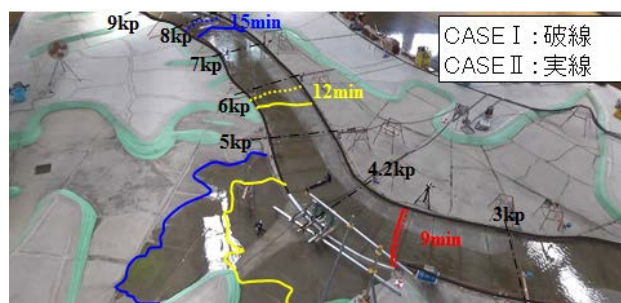


図-9 CASE I・II 津波先端比較図 (模型中流・上流側)

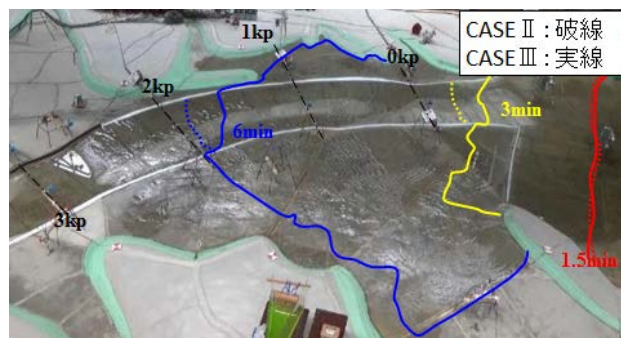


図-10 CASE II・III 津波先端比較図 (模型下流側)

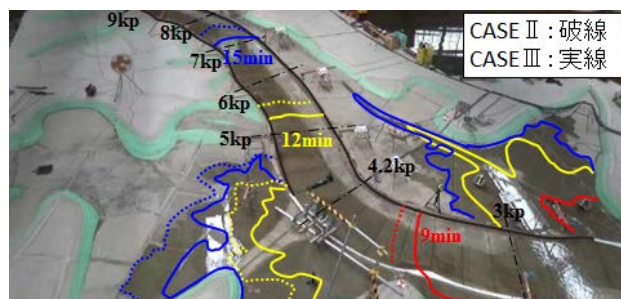


図-11 CASE II・III 津波先端比較図 (模型中流・上流側)

は、右岸において5kpでは2m程低い値。左岸において7kp及び10kpでは1m程低い値となった。

次に、CASE IIと、右岸の海岸堤防～4.6kp及び左岸の海岸堤防～2.4kpまで再現堤防、他は壁立堤防を設置したCASE IIIを比較したとき、CASE IIIは8kpより下流の地点において左右岸ともに低い傾向がみられた。具体的には、右岸において2～5kpでは1～2m程低い値。左岸において1～3kp、5kp及び6kpでは1～2m程低い値となった。

##### b) 流況観察

越流区間が到達速度に与える影響を比較するため、CASE I～IIIの津波先端比較図を図-9～図-11に示す。(背景の写真において、図-9はCASE II、図-10及び図-11はCASE IIIを使用)ただし、CASE IとCASE IIの比較においては堤防状況の変化が右岸3.8～4.6kpのみのため、比較は模型中流・上流側のみで行った。

CASE IとCASE IIを比較したとき、再現堤防区間通過前では同速度で津波先端は遡上しているが、再現堤防区間通過後では同時刻の遡上距離に差が生じた。具体的

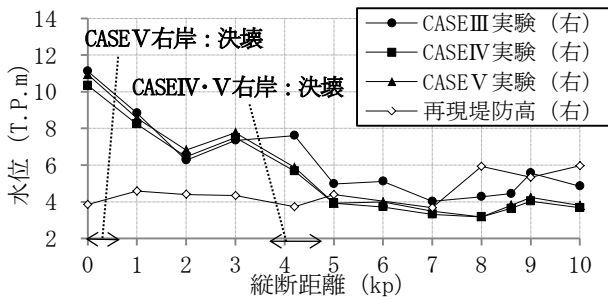


図-12 CASEIII～V 実験最高水位縦断面図 (右岸)

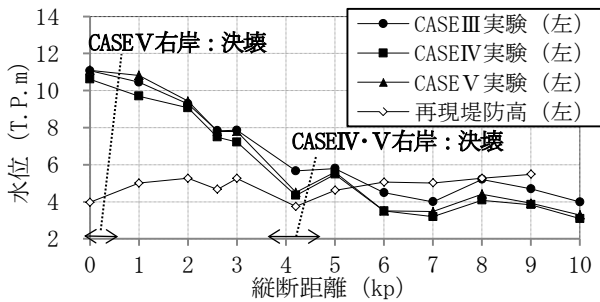


図-13 CASEIII～V 実験最高水位縦断面図 (左岸)

には、河道内において12分及び15分時点でCASE I より200m程下流側にCASE II の津波先端が位置していた。

次にCASE II とCASE IIIを比較したときにおいても、再現堤防区間で同時刻の遡上距離に差が生じた。具体的には、河道内において3～15分時点ではCASE II より200～300m程下流側にCASE IIIの津波先端が位置していた。また、中流右岸堤内地においては12分及び15分時点ともにCASE II より全体的に遅くCASE IIIの津波先端が位置していた。

### c) 考察

以上の結果より、再現堤防区間及びその上流は、壁立堤防より最高水位が低くなる地点がある傾向となり、堤内地へ津波が浸水することにより最高水位が変化することが確認された。

また、再現堤防区間及びその上流は、壁立堤防より到達速度が遅くなる傾向がある。これは、津波の流速は水深に依存する<sup>9)</sup>ことから、水位が低下した影響により、到達速度が遅くなったと考えられる。

## (2) 決壊区間

### a) 水位計測

決壊区間が最高水位に与える影響を比較するため、CASE III～Vにおける各地点の最高水位をプロットした縦断面図について、右岸を図-12、左岸を図-13にそれぞれ示す。

右岸の海岸堤防～4.6kp及び左岸の海岸堤防～2.4kpまで再現堤防、他は壁立堤防を設置したCASE IIIと、CASE IIIの堤防状況から右岸3.8～4.6kpのみ堤防をあらかじめ決壊させたCASE IVを比較したとき、CASE IVは決

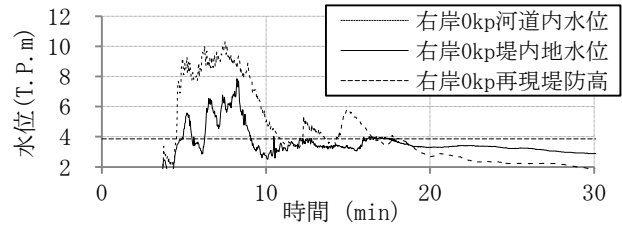


図-14 CASE IV 右岸0kp時系列水位

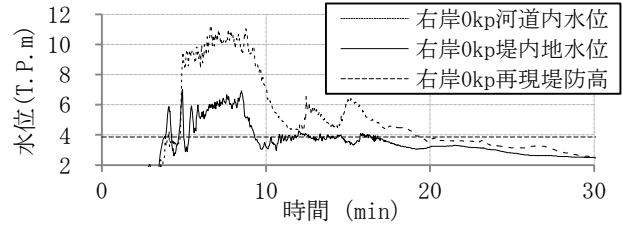


図-15 CASE V 右岸0kp時系列水位

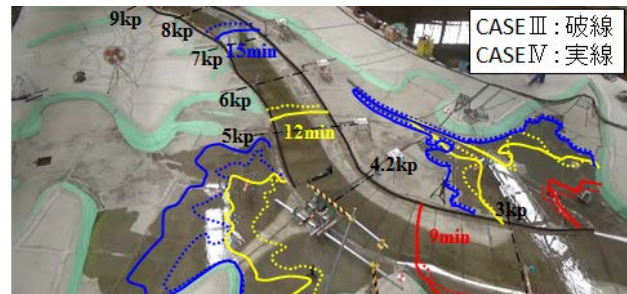


図-16 CASE III・IV 津波先端比較図 (模型中流・上流側)

壊区間を含め、その上流の最高水位は低くなる傾向があった。具体的には、右岸において4.2kpでは2m程低い値、その地点以降では1m程低い値となった。左岸においても右岸と同様の傾向となり、4.2kpでは2m程低い値、その地点以降では1m程低い値となった。

次に、CASE IVとCASE Vを比較したとき、全体的に同程度の値となった。しかし、右岸海岸堤防を決壊させたCASE Vが左右岸ともに0～1kpのみにおいては1m程高い値となった。この原因を考察するため、CASE IV及びCASE Vにおいては図-5に示す0kp右岸河道内と堤内地に設置した水位計より計測された時系列水位の比較を実施した。その時系列水位を図-14及び図-15に示す。CASE IVの右岸0kpにおいては河道内水位が堤内地水位より早く再現堤防高より高い値になることに対し、CASE Vの右岸0kpにおいては堤内地水位が河道内水位より早く再現堤防高より高い値となった。

### b) 流況観察

破堤区間が到達速度に与える影響を比較するため、CASE III～Vの津波先端比較図を図-16～図-18に示す。

(背景の写真において、図-16はCASE IV、図-17及び図-18はCASE Vを使用)ただし、CASE IIIとCASE IVの比較においては堤防状況の変化が右岸3.8～4.6kpのみのため、比較は模型中流・上流側のみで行った。

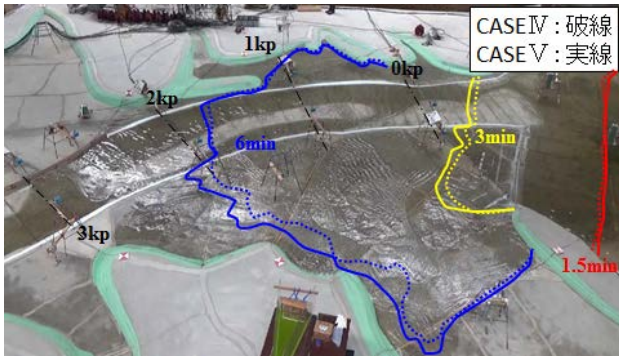


図-17 CASEIV・V 津波先端比較図 (模型下流側)

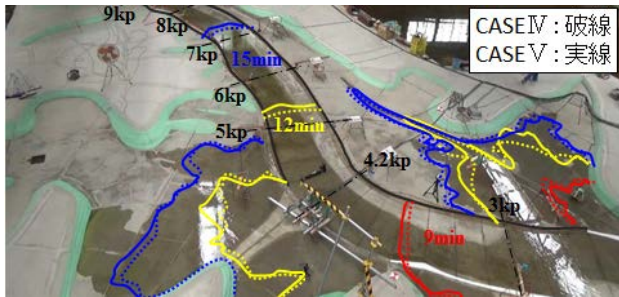


図-18 CASEIV・V 津波先端比較図 (模型中流・上流側)

CASEIIIとCASEIVを比較したとき、決壊区間通過前では同速度で津波先端は遡上しているが、決壊区間通過後では同時刻の遡上距離に差が生じた。具体的には、河道内において12分及び15分時点でCASEIIIより200m程下流側にCASEIVの津波先端が位置していた。また、右岸堤内地においては12分及び15分時点ともにCASEIIIより全体的にやや速くCASEIVの津波先端が位置していた。

一方、CASEIVとCASEVの比較したときにおいても決壊区間で同時刻の遡上距離に大きな差は見られなかった。

### c) 考察

以上の結果より、決壊区間及びその上流は、再現堤防の場合と比較して上流側の最高水位が低くなる傾向と低くならない傾向の両方を確認できた。また、最高水位が低くなるときの決壊区間及びその上流は、再現堤防の場合より到達速度が遅くなる傾向があった。

次に、中流決壊区間と右岸海岸堤防決壊区間による上流側への影響を比較したとき、中流決壊区間が与える上流側への影響の方が大きくなった。これは決壊区間の最高水位が低くなるに伴い、越流水深が大きくなることから、堤内地への浸水量が大きく増加したことによる影響と考えられる。

なお、右岸海岸堤防を決壊させた実験では、右岸海岸堤防を決壊させない実験よりも右岸堤防決壊区間の最高水位が高くなったが、その原因については今後の課題となった。

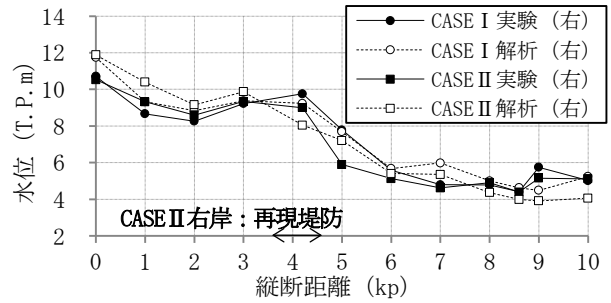


図-19 CASE I・II 実験及び解析最高水位縦断面図 (右岸)

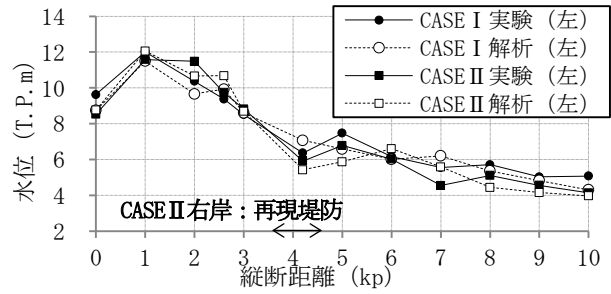


図-20 CASE I・II 実験及び解析最高水位縦断面図 (左岸)

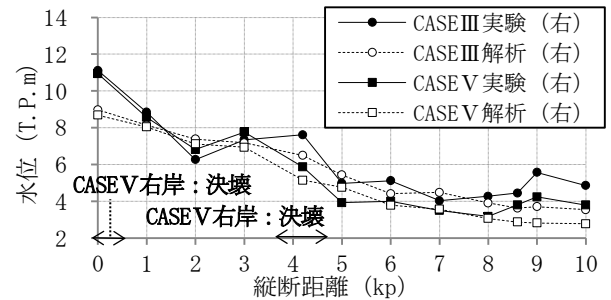


図-21 CASEIII・V 実験及び解析最高水位縦断面図 (右岸)

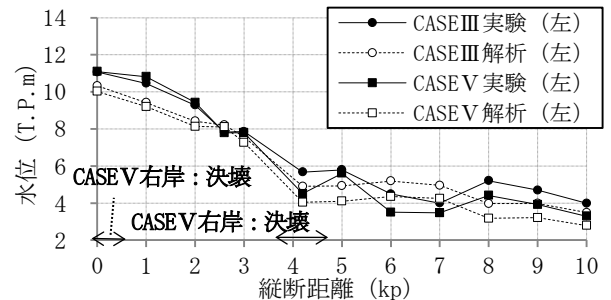


図-22 CASEIII・V 実験及び解析最高水位縦断面図 (左岸)

## 4. 解析による実験最高水位再現性の確認

### (1) 解析の手法

解析は手引きに基づく手法を用い、実験と同様の条件にて実施し、実験の傾向を再現できるか検証した。基礎方程式は非線形長波理論、数値解析法はLeap-frog法による有限差分法の平面2次元モデル、入力波形は実験で湾口部水位計O1 (図-1) 3点の平均計測値、再現性の比較は実験の水位計と同位置とした。格子はデカルト2m

メッシュ、計算ステップはクーラン数0.2を満たすように設定した。

なお、堤防越流のモデルについては以下の通りとした。堤防の形状については実験模型と同様に越流を受けても形状を保つ条件とした。流れの基礎方程式については河道内と同様に非線形長波理論とした。

## (2) 解析による実験最高水位の再現性

### a) 越流区間

越流区間が最高水位へ与える影響を解析によって再現可能か確認するため、CASE I とCASE IIにおける各地点の実験及びその再現解析最高水位をプロットした縦断面図について、右岸を図-19、左岸を図-20にそれぞれ示す。

実験にて確認された再現堤防区間及びその上流において、壁立堤防時より最高水位が低くなる現象は再現解析においても概ね同様の傾向になった。具体的には、再現解析を比較したとき、CASE IIは左右岸ともに4.2kp及び5kpで低い値となった。

### b) 破堤区間

破堤区間が最高水位へ与える影響を解析によって再現可能か確認するため、CASE IIIとCASE Vにおける各地点の実験及びその再現解析最高水位をプロットした縦断面図について、右岸を図-21、左岸を図-22にそれぞれ示す。実験にて確認された中流の決壊区間及びその上流において、再現堤防時より最高水位が低くなる現象は再現解析においても概ね同様の傾向になった。具体的には、再現解析を比較したとき、CASE Vは左右岸ともに4.2kp以降、1～2m程低い値となった。

## 5. まとめ

東日本大震災において河川津波の生じた北上川の模型を作成し、堤防状況（決壊の有無、堤防高など）が津波の最高水位及び到達速度へ与える影響を実験によって把握した。また、再現解析によって現状の解析手法でこの堤防状況による変化の傾向を概ね再現可能であった。

これらの結果から、堤防状況は最高水位及び到達速度へ影響を与えることが分かり、「津波浸水想定の設定の

手引き」に基づく予測解析を実施したとき、越流開始後すぐに決壊するシナリオはその上流の最高水位について低めに見積もる場合があることが確認されたため、上流側の最高水位把握のためには決壊しないシナリオを検討することも必要である。一方、右岸海岸堤防を決壊させたシナリオより、上流側の最高水位及び到達速度は大きく変化せず、必ずしもシナリオによって変化しない場合もあることが確認された。

以上より、予測解析を実施する際は越流開始後すぐに決壊する堤防区間及び決壊しない堤防区間を設定した堤防状況のシナリオを複数作成し、各地点において最も危険となった最高水位及び到達速度より検討することが望ましいと言える。

## 参考文献

- 1) 河川津波対策検討会委員：河川への遡上津波対策に関する緊急提言，2011。
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：河川津波対策について，2011。
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室他：津波浸水想定の設定の手引きver.200，2012。
- 4) (財)国土技術研究センター：津波の河川遡上解析の手引き（案），2007。
- 5) 田中仁，Nguyen Xuan Tinh，盧敏，Nguyen Xuan Dao：2010年チリ地震津波の東北地方河川への遡上-河口地形と遡上特性との関連，土木学会論文集B1（海岸工学），Vol.67，No.4，I\_1627-I\_1632，2011。
- 6) 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，I\_261-I\_265，2013。
- 7) 中村賢人，森啓年，鈴木宏幸，服部敦：津波遡上の最大水位に河川流量が与える影響に関する実験，平成27年度全国大会第70回年次学術講演会，II-152，2015。
- 8) 松井大生，内田龍彦，中村賢人，服部敦，福岡捷二：非静水圧準三次元解析法による津波河川遡上・氾濫流解析の検討，平成27年度全国大会第70回年次学術講演会，II-155，2015。
- 9) 首藤伸夫，今村文彦，越村俊一，佐竹健治，松富英夫：津波の辞典，朝倉書店，2007。

(2016. 4. 4受付)