

東日本大震災における津波の河川遡上による堤防越流と被害状況の把握

TSUNAMI PROPAGATION IN RIVERS AND OVERTOPPING FROM RIVER EMBANKMENT AFTER THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE

田中規夫¹・八木澤順治²・佐藤誠幸³・細萱 陽⁴

Norio TANAKA, Junji YAGISAWA, Masayuki SATO and Yoh HOSOGAYA

¹正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科・(兼)環境科学研究センター (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

²正会員 博(学) 埼玉大学大学院助教 理工学研究科・(兼)環境科学研究センター (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

³学生会員 学士 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

⁴非会員 理修 有限会社 シーマス (〒950-3304 新潟県新潟市北区木崎 2235)

The tsunami caused by the Great Japan Earthquake on 11 March 2011, broke most of the sea embankment and coastal vegetation belt and caused catastrophic damage to people and buildings in the Tohoku and Kanto regions of Japan. Field surveys were conducted to elucidate the damage to river embankments and their hinterlands (residential area) by tsunami propagation in river channels and overtopping of embankments. Ten rivers were selected for the field investigation. In the hinterlands where overtopping occurred, the tsunami came from two directions, coast and river. It is necessary to identify locations of river embankments that can be easily overtopped by a tsunami in different tsunami conditions, river morphology and inland embankment of roads or trains. Tsunami inundation patterns were classified by the river capacity and whether a river or sea embankment was breached or not. This will provide useful information for making new hazard maps and planning new cities. Numerical simulation in Abukumagawa River shows the clear relationship between the scoured area and the tsunami overtopping time.

Key Words : tsunami propagation in river channels , overtopping flow , meandering of river channel, Great East Japan Earthquake

1. はじめに

地震によって大津波が発生した際、沿岸部に甚大な被害を発生させるだけではなく、沿岸より数 10km 先まで河川を遡上し被害を発生させることがある。津波の河川遡上により生じる実害としては、水門や橋脚などの河川構造物への被害、河川堤防より越水し内陸部の浸水域を拡大させること、が挙げられる。2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災においても河川を遡上した津波が堤防を越水した形跡が多くの河川で確認された^{1),2),3)}。

多くの実験^{4),5)}や解析⁶⁾により、孤立波のような性質を持つ津波は形や速度を変えずに内陸の奥深くまで侵入することが示されている。一方、実河川を遡上する津波は河道形状の影響を強く受けることが想定される。孤立波の湾曲水路での変形は数値計算で検討されている^{7),8)}ものの、実際の河川で津波がどのように挙動し氾濫したかの情報は少ない。また、内陸を遡上する津波が道路や鉄道の盛土阻害線によって受ける影響は不明の点が多い。

これまで津波の数値計算方法に関する研究^{9),10),11)}は多

岐にわたり行われており、それを用いて津波ハザードマップの作成が多くなされている。広領域計算では、佐竹ら¹²⁾は断層に初期変動を与え、津波計算を行い石巻平野・仙台平野における津波堆積物の分布と比較している。そして、869 年に発生したとされる貞観津波の再現シミュレーションを行っており、断層計算を含む数値計算により過去の津波においても整合性のあるシミュレーションを行うことができることを示している。

しかしながら、河川を遡上した津波が氾濫するような事象はこれまで少なかったことから、実際の氾濫を伴う津波の河川遡上現象と数値シミュレーションの比較検討は行われていない。特に、河川を遡上する津波が河川の蛇行部で遠心力の影響を大きく受けて、蛇行部外岸側において水位を増して越流する現象が、東日本大震災時に生じている^{1),2),3)}。同津波では、堤防を越水した津波が堤防法面で加速され地面に衝突することで堤防法尻付近を激しく洗掘し、堤防近傍の樹木や家屋の流失を引き起こす例が多く見られた。また、河川を越流した津波と、陸上を遡上した津波に挟まれてしまった地域での津波被害

が報道などで報告された。

上記を踏まえ、本研究では、河川を遡上する津波と堤内地を遡上する津波の水のやり取りに注目し、氾濫が生じるときの津波の実態をまず定性的に解明することを目的とする。次に、その代表的事例において、河道内から内陸部への越流量と越流時間を算出し、越流特性と河川堤やその近傍における被害との関係性を評価する。そのため、河川堤防を越流した津波による被害が顕著であった阿武隈川を選定し、断層に初期変位を与えて津波の再現計算を行い、ネスティングにより太平洋沿岸を含む広い領域から阿武隈川河川遡上を表現できる狭い領域までの再現計算を行う。また、現地観測によって得た津波痕跡高等と比較することで、シミュレーション結果を検証する。さらに、実際の津波来襲時に計器の故障などで把握できなかった、阿武隈川河川堤防からの越流量の時間的・場所的变化を調べ、現地調査より得た河川堤防侵食量や堤内地の洗掘領域のスケールと越流時間との関係性を把握することとする。

2. 研究方法

(1) 津波被災地の現地調査

田中ら^{1),2),3)}は、2011年3月から5月にかけて、図-1に示す津波影響を受けた東北と関東地方の10河川で氾濫原の河川における水のやり取り、堤防の決壊の有無に注目した調査を行った。津波水深は衝突痕、屋根の上の浮遊物堆積高さ、最大湛水部における壁の汚れなどから計測した。津波の方向は樹木、フェンスの倒れた向き、家の壊れている壁の位置、落堀のできている位置などから総合的に判断した。河川の越流水深は、堤防上フェンスにおけるゴミの付着状況や堤防付近に残存するビルにおける痕跡をもとに推定した。越流被害の程度は堤防裏法面の侵食状況、落堀の大きさ、堤防沿い家屋の河裏側側面の破壊状況・局所的深掘れ、等に注目し、それぞれの項目において、河川沿い方向の長さや河川直角方向の長さを計測した(図-2)。深さの分布は場所により計測不能であったため、計測できる範囲を参考値として取得した。

(2) 河川遡上津波の計算

谷本ら¹⁰⁾は河川遡上津波に対する海岸林や河道内樹林の影響を考慮するために、樹林抵抗の鉛直特性を取り入れた数値解析モデルを構築している。その研究の中でKennedyら¹³⁾、Madsen and Sorensen¹⁴⁾等を参考に碎波減衰項、底面せん断応力、樹林抵抗力、Boussinesq分散項を基礎方程式に加えた形で数値解析を行い、Boussinesq分散項をもちいて河川や浅水域を遡上する際に生じるソリトン分裂波¹⁵⁾を数値計算上で表現できることを明らかにしている。しかし、本研究では、その第一段階として非線形長波モデルまでの計算で、越流時間

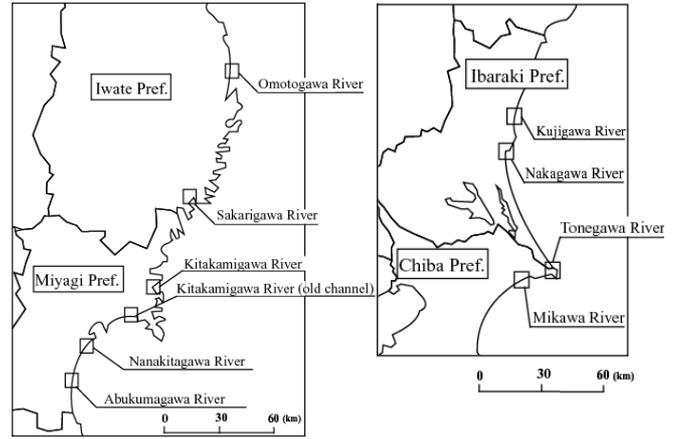


図-1 調査対象河川位置図

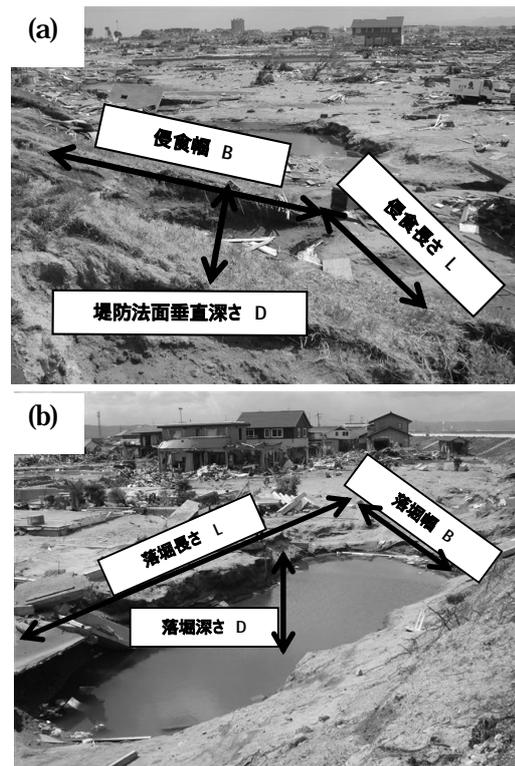


図-2 洗掘領域の計測と定義：(a)堤防侵食、(b)落堀

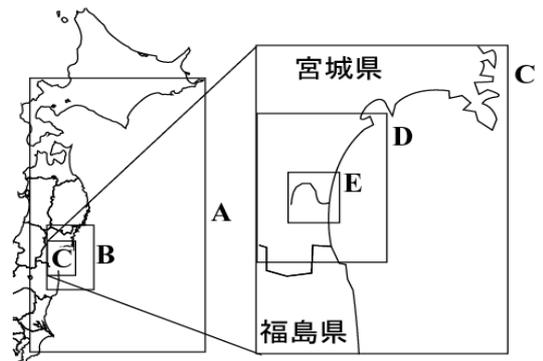


図-3 数値計算領域(左：AからC領域の計算範囲、右：CからD領域の計算範囲)

を算定することを試みる(検証データが少ないため)。実際の計算では、図-3に示すように領域を5段階で細分化しネスティング手法を用いた計算を行う。まず、グリッ

ドサイズ1350mのA領域では線形長波式を用いて津波計算を行う。またB領域(450m)C領域(150m)D領域(50m), E領域(16.7m)については非線形長波式を用いて津波計算を行っている(括弧内はグリッドサイズを示している)。非線形長波方程式の連続式を式(1)に, x方向, y方向の運動方程式をそれぞれ式(2), 式(3)に示す。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{\zeta + h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{\zeta + h} \right) +$$

$$g(\zeta + h) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gn^2}{(\zeta + h)^{7/3}} Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} = 0$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{\zeta + h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{\zeta + h} \right) +$$

$$g(\zeta + h) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gn^2}{(\zeta + h)^{7/3}} Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} = 0 \quad (3)$$

ここに, ζ は水位(m), Q_x, Q_y はxおよびy方向の線流量(m^2/s) h は初期状態の静水深(m) g は重力加速度(m/s^2), n はマンニングの粗度係数($m^{-1/3}s$)である。津波の初期水位変位としては後述するように, Mansinha & Smylie¹⁶⁾の式により断層変位を与えて, その変位を鉛直上の海域の水位変位として与えた。境界条件としては, A領域からの流出量については, 特性曲線法を基に後藤・小川¹⁷⁾の方法で自由透過させた。また, A-C領域については格子サイズの関係から内陸部への遡上は計算精度が劣るため, 内陸遡上を考慮せずに完全反射境界とした。D-E領域の陸上遡上を考える際には, 岩崎・真野¹⁸⁾の方法で流量計算を行った。なお, 断層モデルについては, 藤井・佐竹¹⁹⁾により報告されている断層モデルを使用することを基本とし, 後述する方法で断層変位量を調整した。本研究では, 差分は空間的にはスタッガードグリッドで水位と線流量を半格子分ずらした形で計算を行い, 時間的にはリープフロッグ法を用いて, 陽的差分により水位と線流量を計算した。A-D領域の海底地形データは, 日本水路協会から公開されているデジタル水深データ(日本近海1000mメッシュ海底地形データ)を用いた。E領域については, 国土地理院の5mメッシュ標高データをより作成し, 河道内の標高は阿武隈川河川横断面の標高データ(国土交通省仙台河川国道事務所より提供)を用いて修正した。

3. 結果および考察

(1) 防潮水門がない場合の被害事例

阿武隈川において津波痕跡水深の測定結果を図-4に示す。なお, 各地点の写真付きの詳細な報告は田中ら²⁾を参

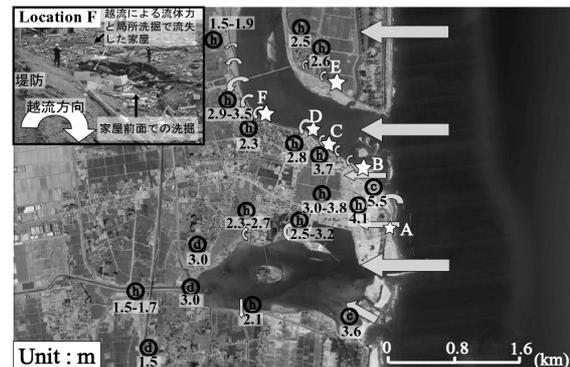


図-4 阿武隈川河口域における津波痕跡浸水深の測定結果とF地点付近における家屋の被害状況(図中の数値は津波痕跡浸水深(m)を示す)

照されたい。図-4のA地点では海岸堤防は一部決壊しているが, 決壊していない箇所も大きな落堀ができていことから越流のすさまじさがわかる。このA地点の近くにおける痕跡水深は5.5mで堤防高さは4.8mであった。B地点では堤防上のフェンスのごみ付着位置から, 越流水深は1m以上と判断した。この地点の下流側は海岸堤防と河川堤防の接続箇所であり決壊していた。C地点でも越流はすさまじかったが, 上流のD地点とE地点のほうで越流による被害は軽微であった。しかしさらに上流のF地点では蛇行流路の外岸部に当たり, 津流による家屋被害は大きく洗掘により流失した家屋も確認できた。上流のほうで越流被害が激しかった理由は3つほど考えられる。1つは蛇行部の外岸側であるため遡上につれて水深が上昇したこと, 2つめは上流側に巨理大橋がありここが水をせき上げるような形となりその下流側のF地点は局部的に越流水深が上昇したこと, 3つ目は堤防沿い道路と家屋の位置関係である。D地点とE地点では, 堤防沿い道路が水たたきのような役割を果たし, 越流した流れは家屋に水平に壁を突き破るように侵入したのに対し, F地点では道路が家屋の敷高よりも高かったため, 堤防道路を越えた流れが家屋に斜めに当たったため激しい洗掘を伴う破壊(図-4)が生じたと判断される。このように河川沿いの一部地域では遡上津波による氾濫破壊が主体であったと考えられる。

河川を横切る障害線が河川からの氾濫を際立たせた例としては, 七北田川, 閉伊川, 盛川, 新北上川が上げられる。七北田川でも陸側と河川側で遡上した津波のやり取りが確認された(写真を含む詳細な被害調査結果は田中ら²⁾を参照)。左岸側の堤内地を遡上した津波は家屋破壊流失しながら水位を上昇させ, 河口から1.5km付近では河川堤防を越水したと考えられる(河川内の落堀形成状況より)。その一方で, 河口から2.0-2.5km付近では河川から堤内地に氾濫した痕跡が確認された(越流水深は0.5-1.0m程度)。津波は一波だけではないため断定はできないが下流から合流した津波とそれに付随する大量の浮

遊物が高砂橋(橋桁に浮遊物が衝突した痕跡がある)でせき上げられたため河川からの氾濫が生じたと判断される。

閉伊川では、山田線が海岸からの津波を阻害する役割を果たした一方で、山田線の下流にある橋梁が船などの浮遊物影響で橋桁が飛ばされ、その影響で上流側でも越流氾濫が生じている(堤防侵食は軽微であり継続時間は短かったと判断される)。盛川でも同様に南リアス線橋梁と南リアス線の下流にある道路が内陸遡上津波の侵入を阻害する役割を果たしたのに対し、その上流側では河川からの氾濫は続いており、河川堤防にガリー侵食が確認された。侵食の間隔は平均 1.08m (標準偏差 0.68m)、侵食幅は平均 1.09m (標準偏差 0.66m)であった。阻害線は有効であるが、その上下流で氾濫形態が大きく変わることから避難計画の策定においては注意が必要である。新北上川は阻害線ではないが、山付部で海岸からの津波の遡上はおおよそ食い止められたが、山付部上流では河川側の遡上津波の氾濫が継続し、堤防の決壊が生じた。

河川蛇行部外岸側からは遡上津波が氾濫しやすいことはすでに数値計算などで示されている^{7),8)}。今回の津波では、阿武隈川以外では、旧北上川の例が顕著であった。右岸側では国道 398 号線の橋梁付近までは河川からの氾濫痕跡は明瞭であるが、3.0km 地点を過ぎると目立った氾濫痕跡は確認できなかった。一方、蛇行部外岸側にあたる左岸側では、氾濫は約 4km 地点でも生じており、越流した箇所河道側の樹木に付着したゴミからは最大で 2m 程度あったと想定される。また、那珂川の支川・涸沼川でも蛇行部での氾濫が観測されている¹⁾。

(2) 防潮水門がある場合の被害事例

防潮水門より上流側でも氾濫が起きていた事例として小本川、上流側では河川内水位は低かったため、逆に海側からの氾濫水が河川方向に決壊した事例として津軽石川が上げられる。小本川河口の海岸堤防は地盤から 10m 程度であったが、堤内側の落堀形成状況や海岸林の破壊・流失状況から海岸堤防を越えた津波がこの地域の主であると判断できる。一方、津軽石川では河川・海岸堤防の両側から氾濫があり、氾濫形態はより複雑であった。

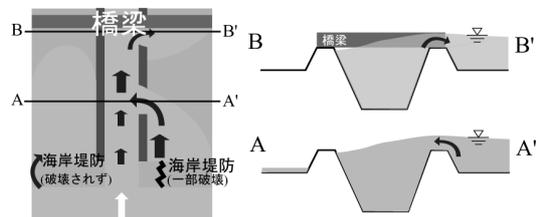
(3) 氾濫形態の分類

すべてを網羅しているわけではないが、今回示した氾濫事例は、河川堤防の高さ、海岸・河川堤防の決壊の有無、河口付近での蛇行の有無、河川を横切る阻害線の有無、防潮水門の有無などによって分類可能である。分類図を図-5 に示す。ケース 1 は、盛川や新北上川で見られた事例、ケース 2 は旧北上川で見られた蛇行影響、ケース 3 は防潮水門が関係する事例であり、阿武隈川はケース 1、2 が重なった事例ととらえることができる。七北田川の橋梁部では橋梁そのものが阻害線の役割を果たしたと考えればケース 1 となる。

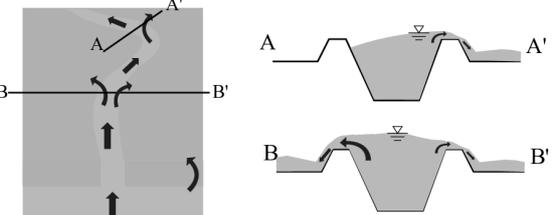
(4) 阿武隈川での津波遡上計算の検証

図-6 に阿武隈川左岸沿岸域の複数地点における痕跡水位と、数値計算で得た最大水位との比較を示す。図には著者らが実施した痕跡水位とともに、東北地方沖太平洋地震津波合同調査グループの調査結果²⁰⁾も合わせて示す。この図より、断層の初期変位を公開されているデータ¹⁹⁾を用いた場合(初期変位 1.0 倍)、解析水位がやや過大評価となった。そこで、本研究では解析水位と痕跡水位が合うような断層の初期変位を試行錯誤的に把握した。その結果、図に示すように断層の初期変位を 0.9 倍とした時に解析水位が痕跡水位をよく表現することができた。一方、図-7 に阿武隈川堤防沿いで得られた痕跡水位と解析水位の縦断分布を示す。これらの図より、右岸・左岸においても解析水位は痕跡水位を概ね満足している。右岸側の距離標 1.5km 付近で痕跡水位が局所的に大きくなっているが、これは巨理大橋による水位のせき上げがあったことが原因である。今回用いた数値解析では橋梁を考慮していないため、水位の上昇が表現できなかったと考えられる。また、図-6 と同様に断層の初期変位が水位に及ぼす影響を把握したところ、右岸側ではそれほど差が見られなかった。しかし、左岸側では 1.0 倍よりも 0.9 倍のケースの方が痕跡水位に大幅に近づいており、河川内の水位についても、断層の初期変位を 0.9 倍としたケースのほうが痕跡水位をよく表現できた。そのため、以後の解析では断層の初期変位を 0.9 倍として進めた。

(a) Case 1 ((例) 七北田川)



(b) Case 2 ((例) 旧北上川)



(c) Case 3 ((例) 小本川)

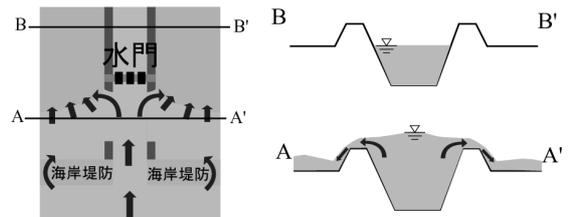


図-5 河川と堤内地の水のやり取りに注目した遡上氾濫現象の分類：(a)ケース 1 (阻害線影響)、(b)ケース 2 (蛇行影響)、(c)ケース 3 (防潮水門)

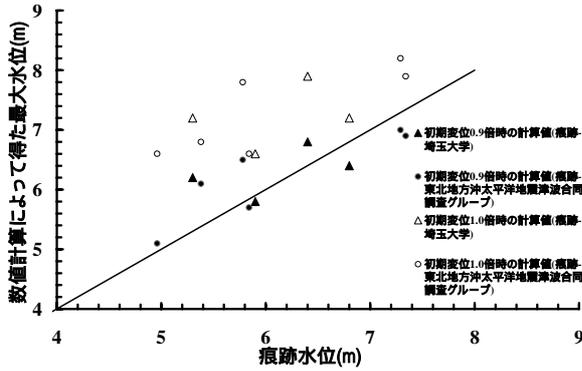


図-6 断層パラメータの同定 阿武隈川周辺の沿岸域における痕跡水位と解析水位との比較

(5) 堤防越流時間と落堀の大きさ，堤防侵食量の関係

図-8 に越流時間と落堀の単位幅あたりの体積(図-8(a))，堤防侵食率(図-8(b))との関係を示す．一般的に越流時間が長いほど侵食・落堀のスケールは大きくなると考えられるが，本研究においても越流時間が400秒を越えると堤防侵食量が増加し，堤防背後の落堀のスケールも大きくなる傾向が確認された．一方で，解析上の越流時間が短い場合でも落堀のスケールや堤防侵食率が大きくなっている地点も見られた．この原因としては，本研究では前述したように，巨理大橋による水位のせき上げを考慮していない．そのため，実際にはより長い時間越流が生じたことで落堀や堤防侵食が大きくなったものと考えられる．また，図-8(b)に示す Point 1,2,3 はC地点(図-4)付近で観測されたデータである．それぞれの観測点は近接しているため越流時間はほぼ同じであるものの，侵食率は大きく異なっていた．この地点では，堤防線形が湾曲した扇型の形状をしており，扇央付近に Point 2,3 が，やや外れた地点に Point 1 が位置していた．河川を遡上してきた波が扇央付近に集中したため，Point 2,3 の侵食率は Point 1 の侵食率よりも大きかったと考えられる．また，阿武隈川では河口右岸側から水路中央付近まで伸びた大きな砂嘴が形成されており，左岸側を通過した津波が回折することで，C地点付近では堤防と直角方向に曲げられた波によって強い越流が生じた可能性がある．しかし，Point 1 は Point 2,3 と比較して，やや河口(砂嘴の裏側)に近い点に位置していたため，回折した波の直撃を避けられたため侵食量が小さかった可能性もある．上記のような波の影響のほか，堤防の構造上の問題も見受けられた．阿武隈川では土堤法面にコンクリート製の斜面や階段が設置されている箇所があり，その付近で大きな侵食が見られた．今回の地震は大きな地震動が生じたため，コンクリートと土との境界面に亀裂ができやすく，その隙間に越流水が入り込むことで大規模な侵食が発生したと考えられる．以上のことから，津波の河川遡上による堤防被害については詳細な地形条件を考慮すべきであることと，越流時間の短縮が堤防侵食と堤防背後の落

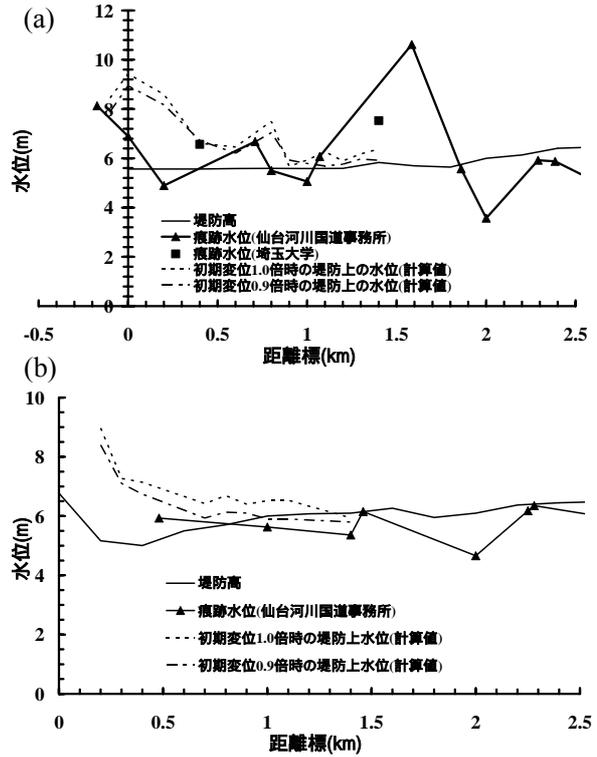


図-7 阿武隈川堤防沿いの痕跡水位を用いた数値計算の検証 (a) 右岸, (b) 左岸

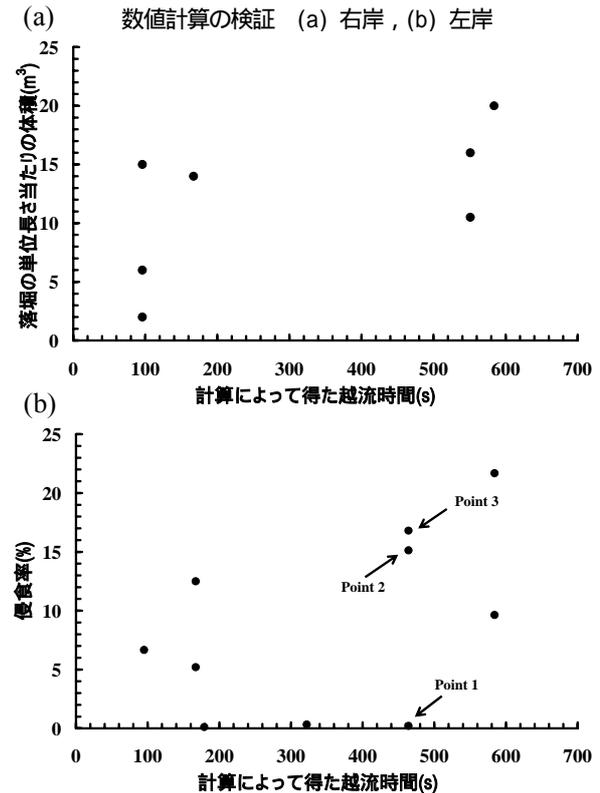


図-8 越流時間と洗掘量の関係 (a) 落堀, (b) 堤防侵食

堀形成の軽減につながるという。今回の津波氾濫に関しては，決壊しなかった地点においても堤防の25%程度までの侵食が確認された．河川遡上において越流時間を短くすることが河川堤防の被害を軽減するため，堤防高

さや幅について、レベルの津波に対して粘り強さを発揮できるような堤防高さや堤防幅の検討が必要である。それは、河川沿いの家屋被害の軽減につながるという。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

現地調査より、河川を遡上した津波は蛇行部の外岸側や障害線との交差部から越流し、裏法面に侵食域ならびに裏法尻に大規模な落堀を形成し、それに伴う家屋流失被害を生じさせていたことがわかった。また、スケールの異なる10河川での津波浸水形態の比較より、その形態は、蛇行や障害線以外に、河道の容量、海岸・河川堤防の決壊の有無、防潮水門の有無、により分類できる可能性が見られた。

阿武隈川を対象とした数値計算より、現地調査から得られた最大浸水深や堤防からの越流水深を概ね再現できることを確認した。本計算で算出した越流時間と堤防侵食量の比較を行った結果、阿武隈川では400秒程度の越流時間では堤防侵食がそれほど生じず、それ以上になると急激に侵食されることがわかった。また、越流時間以外にも局所的な堤防防線形状、河口砂嘴なども大きな影響を与えた可能性が示唆された。

謝辞: 本研究の一部は土木学会水工学委員会東日本大震災調査団の調査の一部として行われた。国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所には多数の資料を提供して頂いた。また、アジア・アフリカ学術基盤形成事業(コーディネート・田中規夫)、埼玉大学総合研究機構のプロジェクト経費の一部を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中規夫, 八木澤順治, 飯村耕介: 関東地方の河川(久慈川, 那珂川, 利根川, 千葉県三川)における東北地方太平洋沖地震津波による被害状況調査(土木学会水工学委員会東日本大震災調査団報告書の一部), (<http://rde.nhdr.niigata-u.ac.jp/jsce/src/nrtg4favd8t9wyim84i.pdf>), 2011
- 2) 田中規夫, 八木澤順治, 安田智史: 宮城県の河川(七北田川, 名取川, 北上川, 阿武隈川, 吉田川)における東北地方太平洋沖地震津波による被害状況調査(土木学会水工学委員会東日本大震災調査団報告書の一部), (<http://rde.nhdr.niigata-u.ac.jp/jsce/src/hq9mooyzckk1pqg01ilx.pdf>), 2011.
- 3) 田中規夫, 八木澤順治, 安田智史: 岩手県の河川(小本川, 閉伊川, 津軽石川)における東北地方太平洋沖地震津波による被害状況調査(土木学会水工学委員会東日本大震災調査団報告書の一部), (<http://rde.nhdr.niigata-u.ac.jp/jsce/src/o11tn4p3f7kys7gz04b.pdf>), 2011.
- 4) Peregrin, D.H.: Long waves on a beach, J. Fluid Mech., Vol.27, pp. 815-827, 1967.

- 5) Madsen, O.S. and Mei, C.C.: The transformation of a solitary wave over an uneven bottom, J. Fluid Mech., Vol.39, pp.781-791, 1969.
- 6) Benjamin, T.B.: The stability of solitary waves, Proc. R. Soc. Lond. A328, pp.153-183, 1972.
- 7) Shi, A., Teng, M.H., and Wu, T.Y.: Propagation of solitary waves through significantly curved shallow water channels, J. Fluid Mechanics Vol.362, pp.157-176, 1998.
- 8) Yuhi, M., Ishida, H. and Mase, H.: Numerical study of solitary wave propagation in curved channels, Coastal Engineering 2000, Proc. of the Conference, American Society of Civil Engineers, Sydney, Australia., 2000.
- 9) 後藤智明, 首藤信夫: 河川津波の遡上計算 海岸工学論文集, 第28巻, pp.64-68, 1981.
- 10) 谷本勝利, 佐々木寧, 田中規夫, 原田賢治: 河口付近の海岸・河岸における樹林体の津波遡上防止機能を評価する高精度な河川内津波遡上モデルの開発 河川整備基金助成事業報告書, 平成18年度, 2007.
- 11) Mohammad, B.A., 田中仁: 浅水流方程式と乱流モデルを組み合わせた孤立波遡上の数値計算 海岸工学論文集, 第66巻, No.1, pp.91-95, 2011.
- 12) 佐竹健治, 行谷佑一, 山木滋: 石巻・仙台平野における869年貞観津波の数値シミュレーション 活断層・古地震研究報告, No.8, pp.71-89, 2008.
- 13) Kennedy, A. B., James, Q. C., Kirby, T. and Dalrymple, R.A.: Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.126, No.1, pp.39-47, 2000.
- 14) Madsen, P. A. and Sørensen, O.R.: A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry, Coastal Engineering, Vol. 18, pp. 183-204, 1992.
- 15) 谷本勝利ほか: 1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾技研資料, No.470, 1983.
- 16) Mansinha, L. and Smylie, D. E.: The displacement field of inclined faults, Bulletin of the seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971.
- 17) 後藤智明, 小川由信: Leap-frog法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科資料, p52, 1982.
- 18) 岩崎敏夫, 真野明: オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第26回海岸工学講演会論文集, pp.70-74, 1979.
- 19) 藤井雄士郎, 佐竹健治: 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源(暫定結果 Ver. 4.6), (http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html)
- 20) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (<http://www.coastal.jp/tjt/>) による速報値(2012年3月25日参照)

(2012.4.5 受付)