## 航空測量データ等を用いた津波による 河川堤防の侵食実態調査 RESEARCH ON FACTORS TO GOVERN DAMAGE SEVERITY OF RIVER LEVEES AFTER THE TSUNAMI ATTACK CAUSED BY THE 2011 OFF THE

PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

# 福島雅紀<sup>1</sup>·佐野岳生<sup>2</sup>·成田秋義<sup>3</sup>·服部敦<sup>1</sup>

Masaki FUKUSHIMA, Takeo SANO, Akiyoshi NARITA and Atsushi HATTORI

<sup>1</sup>正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室(〒305-0804 つくば市旭1番地)
<sup>2</sup>工修 共和コンクリート工業株式会社(〒300-0034 土浦市港町1-7-23)(元国土技術政策総合研究所部外研究員)
<sup>3</sup>国土交通省東北地方整備局河川部河川計画課(〒980-8602 仙台市青葉区二日町9番15号)

Authors surveyed damage to river levees caused by tsunami triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. In this paper, characteristics of tsunami run-up and external force acting river levees during tsunami run-up were considered based on on-site survey, tsunami run-up simulation result, and aerial photos and so on. As a result, it was recognized that water cushion in land area would decrease damage of river levee by overtopping from river channel.

Key Words : Tsunami, Run up, Overtopping, Levee erosion, Water cushion

#### 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津 波による激基かつ広域の被害を受けて、「河川への津波 遡上対策に関する緊急提言」が取りまとめられ(河川津 波対策検討会、平成23年8月)、河川管理における津波 外力の扱い、施設計画における堤防高の考え方等につい て提言された<sup>1)</sup>.想定津波として、地域海岸に作用する 津波の発生頻度と大きさから「施設計画上の津波」、

「最大クラスの津波」を設定し、施設計画上の津波は洪水と並び計画的に防御対策を検討すべき対象として位置づけられ、最大クラスの津波は施設対応を超過する事象として扱い、津波防災まちづくりと一体となった減災の対象とされた.こうした方針のもと、海岸堤防と一連の堤防システムとして河川堤防も所定の機能を果たすことが求められることとなった.

そのような堤防システムを具体化する上で、河川堤防 は、その構造から越流に対して極めて脆弱であることを 考慮する必要がある。例えば、施設計画上の津波をやや 越える規模の津波が作用した場合には河川堤防区間でも ー時的な越流の発生が想定されるが、それに対する河川 堤防の挙動を知ることが重要である.

服部・福島<sup>2)</sup>は、阿武隈川など直轄4河川を対象に発 災直後に実施した現地踏査や痕跡調査結果、遡上津波の 水位記録や映像等から、河川堤防周辺における津波水位 や流況、またそれらと関連付けて堤防等の被災の形態や 程度に関して整理した. その上で、個々の現象を組み合 わせ,現象の全体像の把握を試みた.破堤または堤防断 面を大きく減じるといった程度の大きい被災は、越流に よるものであった.ただし、津波痕跡水位が堤防天端よ り5m以上の高いような区間でも、上記のような程度の大 きい被災には至らない区間が見られた. また, 河口から の距離に応じて被災の程度が単純に減少するのではなく, 堤防法線形状や堤内地の地形等に応じて、被災の程度が 変化していた. こうした津波の越流に対する河川堤防の 挙動とその機構について実態に基づいて整理・分析する ことは、堤防システムについて考えを深めていく上で重 要である.

本論では、区間ごとの被災の程度の違いが顕著に見られた阿武隈川の越流による被災を対象として、その程度 を分けた要因について考察する.





写真-1 津波の堤防への作用状況と堤防の被災状況

#### 2. 踏査結果から見た河川堤防の被災状況

写真-1は、被災直後に撮影された阿武隈川河口付近の 航空写真であり、現地踏査や津波痕跡調査結果を参考に して、痕跡水位と堤防天端高との関係、河川堤防裏のり の被災状況を示す.痕跡水位と堤防天端高との関係につ いては、水没区間、越流区間、堤防高以下遡上区間の3 区間に分けた.水没区間は、河川側水位と堤内側水位が 両方とも堤防天端高より高くなった区間である.越流区

表-1	堤防の被災状況の分類
-10	

被災 レベル	裏のり面
I	草本植物が流れの作用で倒伏しているが、剥離 はほとんど見られない。
Π	ガリ状の部分的なのり面植生の剥離・堤体の侵 食が生じた状態。落堀の形成はない、または軽微。
ш	全面的にのり面が侵食・崩壊し、鉛直に切り立っ た状態。落堀の形成を伴う場合がある。
IV	のり面が流失し、さらに天端まで侵食・崩壊が及 んだ状態。落堀の形成を伴う場合がある。

間は、河川側水位のみが堤防天端高よりも高く、堤内側 への越流が生じた区間である.その上流では、河川側水 位もさらに減衰し堤防天端高以下で遡上した区間である. 被災状況については、表-1の4つの被災レベルに分類し、 写真-1に該当区間を示した.被災レベルが記入されてい ない区間は特筆すべき被災が生じていない.なお、裏の り面はコンクリート等で覆われておらず、草本植物が繁 茂していた.図-1は、津波痕跡水位と堤防高、堤内地痕 跡水位と堤内地盤高の縦断分布を示す.ここで、河川側 最高水位、堤内地最高水位については後述する.水没区 間や越流区間では津波痕跡が残り難いと考えられ、堤防 高を大きく超える津波痕跡は右岸0km付近や亘理大橋右 岸でのみ確認されている.

水没区間は河口部周辺に限られ、上流に向かうに従っ て、越流区間、堤防高以下遡上区間が現れることから、 遡上に伴い津波水位が減衰したことを確認できる.ただ し、越流区間の延長は左右岸で大きく異なり、左岸では 0.5km程度の延長であるのに対して、右岸では2km程度と 長い.河口部右岸を除くと、亘理大橋右岸で堤防高を5m 近く超える津波痕跡水位が確認されており、津波の遡上 に対して湾曲部外岸側となった右岸側で津波水位が高 かったことを推定できる.

河口部付近の水没区間では、河川堤防と海岸堤防との 接続部において、左右岸とも堤防が決壊している<sup>3)</sup>. そ れらの地点を除くと、左岸では0.55km地点の水門周辺で 被災レベルIIIとなったが<sup>3)</sup>、大半が被災レベルI である のに対して、右岸ではIII~IVと被災レベルが高くなって いた.

越流区間でも同様に、左右岸の被災の程度が大きく異なり、左岸側では被災レベルⅠであるのに対して、右岸 側では約2kmにわたる広い範囲で被災レベルⅡやⅢと なっていた.津波痕跡水位の差によって、これ程の被災 レベルの違いが生じたかどうかについては疑問が残る.

さらに,越流区間の右岸では,被災レベルIであった 0.8~1.2km区間の上流で被災レベルIIやIIIの区間が生じ ている.

亘理大橋右岸側において、その下流に比較して高い痕 跡水位が確認されたことを踏まえると、被災レベルは越 流水深とある程度対応していると推察されるが、それの みで左右岸での被災レベルの差異を全て説明できるとは 考えにくい.この点について服部・福島<sup>20</sup>は、堤内地が 河川側からの越流に先んじて湛水することで、もしくは 越流後短時間で堤内地が湛水することで、ウォーター クッションの効果が働き、裏のり面及び法尻の侵食が抑 制されたとする考え方を提示した.以下では、今次津波 を対象とした津波遡上シミュレーション結果<sup>40,50</sup>(以下、 再現計算)から、被災の程度を分けた要因を定量的に検 討する.

再現計算の結果を利用するにあたり、その再現性を事前に確認する必要があるが、水没区間及び越流区間に設置されていた水位計やCCTVは津波で破壊され、水位の時間変化について再現性を確認することはできなかった.

図-1に示す河川側最高水位及び堤内地最高水位は,再現 計算で得られた堤防のり尻の河川側及び堤内側における 水位の最大値である.亘理大橋上流左岸の堤内地最高水 位が,堤内地痕跡水位に比べて高めに算定されているが, その他の区間については痕跡水位をほぼ再現していると し,以下の検討では用いている.

#### 3. 津波の伝播状況と堤内地の湛水状況

再現計算から得た津波の伝播状況を図-2に示す. 凡例 の-3mと12mが同程度の色となっているが, 12m近い水位 は海岸及び河口でのみ確認されている. ここでは河道内 及び堤内地を伝播する津波が薄い色の塊によって表現さ れている. 左岸堤内地では,河道内と同程度の速度で津 波が遡上する状況を確認できる. 一方,右岸側堤内地で は,左岸側と同程度の速度で津波が遡上しているが,海 岸堤防越流1分30秒後,2分後,2分30秒後には,矢印先 端で低水位領域が見られる. これは,堤内地を遡上する 津波が矢印先端に到達する前に,河川側からの越流水に よって湛水し始めたものである. 海岸堤防越流3分後に は点線で囲んだ区間で河川側からの越流水が拡散してお り,堤内地を遡上する津波が当該区間に到達するには, より多くの時間が掛かる. その結果,右岸側ではウォー タークッションの効果が働かない状態で越流が生じたた



(5)海岸堤防越流2分30秒後 (6)海岸堤防越流3分後図-2 津波の伝播状況

め、左岸側に比べて被災の程度が大きくなったと考えら れた.また、図-2の伝播状況から河道法線形によって ウォータークッションの効果が働かない状態で越流を受 ける時間が異なることも推定できる.

この状況を詳細に確認するため,写真-1の地点A~Fで 河川側水位と堤内側水位の時間変化を再現計算から抽出 し,越流時間や被災レベルと合わせて図-3に示した.越 流時間等に付した括弧内の数字は、単位を秒とする越流 時間及び初期越流時間である.ここで、越流時間は河川 側水位が堤防高を超えている時間であり、地点Eのよう に堤内側水位が河川側水位を上回った場合には、その時 間までを越流時間とした.初期越流時間は、河川側水位 が堤防高を超えた時点から、堤内側水位が上昇しウォー タークッションが働くようになるまでの時間である.な お、ウォータークッションが働く湛水位については、越 流水が裏のり面上で跳水する条件から算定した.堤防高 を考慮した上で、のり尻における流速を越流量に応じて ベルヌーイの式で算定し、共役水深から跳水に必要な湛 水位を求めた.

水没区間の地点Aと地点Eでは、越流時間は同程度であるものの、最大の越流水深が地点Aでは約6m、地点Eでは



図-3 堤防のり尻における河川側水位及び堤内側水位の時間変化

約3mと大きく異なる.また,地点Aの初期越流時間が6分 程度であるのに対して,地点Eでは越流開始時点で ウォータークッションの効果が働いていたことを確認で きる.越流水深に差があるとは言え,3m程度の越流水深 は非常に大きく,ウォータークッションによって被災の 程度が低減されたと考えられる.

越流区間の左右岸で比較すると、右岸側の地点B, C, Dでは最大の越流水深が左岸側の地点Fに比べ大きめであ るが、越流時間は6分から8分程度と左右岸で大きな差は ない.初期越流時間で比較すると、地点Fでゼロである のに対して、地点B, C, Dでは2分から7分程度と差があ る.これらの越流区間の4断面の結果を見ると、初期越 流時間とその時間の越流水深が堤防の被災レベルとの相 関が高く、右岸で見られた区間ごとの被災レベルとも整 合している.

#### 4. 越流条件と堤防欠損状況との比較

前節で6断面について確認した結果を水没区間及び越 流区間の全断面で比較し、堤防の被災の程度を分けた要 因として初期越流時間が重要であることを示す. 被災の程度を評価するにあたって、現地調査から大ま かに分けた区間設定でなく、より客観的な指標で堤防の 被災の程度を表現することを考える.堤防を堤内地盤も 含めて10m間隔で輪切りにした断面を作成し、裏のり面 及び堤内地盤について侵食された面積を欠損面積とする. 欠損面積を、図-4に示す裏のり基準断面積で割り、欠損 割合とする.堤防の欠損割合を算定するにあたり、地震 の発生前後で記録された航空測量データ及び定期横断測 量成果を用いて、津波の作用前後の堤防断面形を描く. その際、津波の影響のみによる欠損面積を算定するため、 地震の影響で生じた地盤の水平及び鉛直変位を補正し両 者を重ね合わせた.航空測量データは1点/m<sup>2</sup>の密度で計 測されており、のり肩等の変化点が不明確となる場合が あるが、近傍で計測された定期横断測量成果からのり肩 等の形状を補正した.

堤防欠損量を表-1に代えて用いるにあたり、両者の関係を比較する.図-5は、堤防断面の欠損割合の縦断分布 に被災レベルを重ねて示す.ここで、縦軸は対数表示で あり、プロットのない断面は0.1%よりも小さな断面欠損 割合であることを示す.海岸堤防と河川堤防の接続部で あった左岸0km近傍、水門周辺であった左岸0.5km近傍、 右岸1.6~1.9kmを除くと、断面欠損割合の大きな区間の



被災レベルは大きい. 左岸1.6~1.9km区間で一部小さ目 な断面欠損割合となっているのは、当該区間の裏のり勾 配が7割程度と非常に緩く、裏のり基準断面積が大きい ことが断面欠損割合を小さめにした原因であることを確 認している. 図-6は、欠損割合を0-2%、2-5%、5-25%、 25-50%, 50-75%, 75-100%, 100%以上に区分し、それぞ れの欠損割合と評価された断面の被災レベルを図-5から 集計した結果である. なお、縦軸は集計結果を母数で割 り頻度とした. 被災レベル I のほとんどが欠損割合0-2% であり、被災レベルIVは全て欠損割合100%以上となって いる. 被災レベルⅡとⅢ は異なる欠損割合に分散して いるが、Ⅱは小さい欠損割合に多く、Ⅲは大きい欠損割 合に多くなっている. 欠損割合0-5%に被災レベルⅡやⅢ が含まれるのは、上述した左岸1.6~1.9kmの区間であり、 以下の検討にはこのような断面は含めて検討している. ただし、河川堤防と海岸堤防の接続部、水門や橋梁等の 構造物周辺の断面は除外した.

図-7は、越流時間を横軸に、平均越流水深を縦軸とし、 欠損割合ごとにプロットの形状を変え、越流条件に応じ



(堤防裏のり尻での湛水状況を考慮)

てプロットした結果である.ここで,平均越流水深は越 流時間で生じた越流水深の平均値である.図では右上に 行くほど越流条件が激しくなり堤防の欠損割合も大きく なると考えられるが,欠損割合ごとのプロットの境界が 曖昧である.図-8は,図-7の縦軸を初期越流時間におけ る越流水深の平均値とし,横軸も初期越流時間で整理し 直した結果である.点線で囲んだ一部の範囲を除き,欠 損割合ごとの境界が明確となる.

以上の結果から、同程度の越流条件でありながら被災 の程度が異なった理由は堤内地の湛水状況であり、 ウォータークッションがない状態で越流を受けていた時 間が長い断面ほど、大きな侵食を受けたと考えられた.

### 5. おわりに

阿武隈川を対象として、堤防の被災の程度と越流条件 との関係を定量的な評価に基づいて、被災の程度を分け た主たる要因として、越流水深に加えて堤内地の湛水状 況が挙げられることを示した.再現計算の計算精度を考 慮すると、越流水深や越流時間を厳密に議論することは できないが、越流水深が2m程度で越流時間が4分程度で あれば、堤防断面の欠損割合は50%程度にとどまってい る.

こうした検討結果は、ウォータークッションとして機 能する堤内湛水の水深が小さくなると、ある一定時間以 上、越流が継続する場合には、より小さな越流水深に対 して破堤に繋がる、程度の大きな被災が生じることを示 唆する.このことを堤防システムに引き寄せて考えると、 堤防整備状況と来襲する津波の波高や継続時間等の組み 合わせによっては、規模の小さな津波でも河川堤防区間 において被災の程度が大きくなる、より厳しい状況とな り得ることが予想される.ただし、ウォータークッショ ンとして必要な湛水深については、図-8に示した越流水 深と越流時間との関係からは明確にはなっておらず、こ のことも含めて、上記課題について検討していきたいと 考えている. 謝辞:検討にあたり、宮城県の「宮城県沿岸部航空計測 データ」を使用した.ここに記して謝意を表する.

#### 参考文献

- 河川津波対策検討会:河川への遡上津波対策に関する緊急提 言,http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\_blog/kasentsunami taisaku/teigen/teigen.pdf, 2011.
- 股部軟,福島雅紀:津波による堤防等河川管理施設の被害, 土木技術資料, Vol.53, No.8, pp.22-27, 2011.
- 8)服部敦・福島雅紀:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震 土木施設災害調査速報,国総研資料第646号/土研資料第 4202号,pp.305-341,平成23年7月.
- 河川津波対策検討会:河川遡上津波のシミュレーション結果, 第2回配布資料, http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\_blog/ kasentsunamitaisaku/index.html, 2011.
- 5)国土交通省水管理・国土保全局,国土技術政策総合研究所海 岸研究室:平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策 のための津波浸水シミュレーションの手引き,平成23年7月.

(2012.4.5受付)