

津波による堤防等の被災報告

※「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」(国土技術政策総合研究所、独立行政法人土木研究所、平成 23 年 7 月発行予定)第 6 章から抜粋

6.3 津波による堤防等の被災

河川研究室は、本省・東北地方整備局の要請により災害復旧等に資する情報を得ることを目的として、北上川、鳴瀬川、名取川および阿武隈川を対象に被災状況の概括的把握のための現地踏査を行った。本節は、現地踏査時に得た情報に東北地方整備局、国土地理院等による津波遡上の痕跡や映像など各種データを加えて、水位（川側と堤内側）や流れの向きについて整理するとともに、それらと関連づけて堤防等の被災の形態や程度についてとりまとめたものである。とりまとめにあたっては、河川への津波遡上や被災機構について力学的考察も加え、今後さらに検討を深めていく際の糸口を引き出すことを目的として、現段階で活用できる個々の現地情報を組み合わせて現象の全体像の解釈を試みた。そうした性格の資料であるため、以下の内容は現時点での解釈を示したものであり、今後の検討の進展に応じて適宜確認するとともに、更新の対象となりうる事項を含むことに留意されたい。

なお、津波来襲以前に地震動により既に堤防等に被災・変状が生じていたかは、津波作用による被災について解釈を深めていく上で吟味すべき要素である。この点について本節では、以下に示す理由によって、まずは津波作用に着目して整理している。

- ・ 現地踏査時に観察された土堤本体や基礎地盤の侵食・洗掘・崩壊の形態が、既往研究等の洪水流や越流によるものと酷似しており、また被災形態が痕跡などから推定される津波遡上時の流況とも整合するものであった。こうした観察から得られた知見を整理し、河川における津波の挙動とそれに対する堤防等構造物の応答を考察する上での論点を明確にする。
- ・ 現地踏査範囲において、護岸ブロックやパラペットに地震動によると推察される目地のズレや変形が確認されている¹⁶⁾。また、津波来襲前に撮影された写真から、堤防に隣接するアスファルト舗装に液状化によると推察される変状が確認されている¹⁶⁾。これら構造物の変状は流水に対する構造物の応答に対して一定の影響を与える可能性があり、今後、被災機構について定量的に検討を深めていく際に留意する必要がある。そこで津波作用に対する護岸ブロックやパラペット等の被災の形態や程度といった特徴を整理するにあたっては、上記の耐力への影響を加味しても論理的な不整合を生じない概括的な事項に留める。

本節は上記の考え方に基づく整理であり、地震動の影響については今後情報をさらに広く収集し、精査する必要があることに留意されたい。

6.3.1 河道内および河川近傍の堤内地における津波遡上

(1) 河道内の津波遡上の概況

仙台平野に河口を有する河川周辺への津波第1波目の遡上状況を捉えた映像^{17), 18)}によると、河川周辺の堤内陸域への津波遡上に先行して、河道内を遡上している状況が見られた。また、堤内側からの越水が生じた区間においても堤防のり尻際の高水敷の洗掘（落堀）の形成が不明瞭であり、また天端のり肩部周辺ののり面侵食が顕著であったことなどは、河道内の水位が堤内側に先行して上昇していたことを示唆するものと考えられる（被災状況の詳細については6.3.2参照）。

新北上川に設置された2箇所の水位観測所で観測された津波遡上時の水位経時変化を図

-6.56に示す。なお、2観測所間において痕跡水位は堤防高を下回っている（図-6.57(a)参照）。下流側の福地観測所では1波目の津波遡上時に2分程度で約3mといった急激な水位上昇が生じている。これは河川に沿って設置されたCCTVカメラで津波遡上を捉えた動画で見られた段波状の津波遡上に対応する変動を捉えたものと考えられる。

また、津波が上流へ伝播する波速は、2観測所での1波目ピーク水位間の時間差と観測所間の縦断距離（6.37km）の商として算定すると、約8m/sとなった。また、上流への伝播に伴い波高が低減しているが、最大水位の発生時刻に着目すると河口側の福地観測所のほうがその上流の飯野川上流観測所より遅くなっていることから分かるように、その低減の仕方は複雑である。

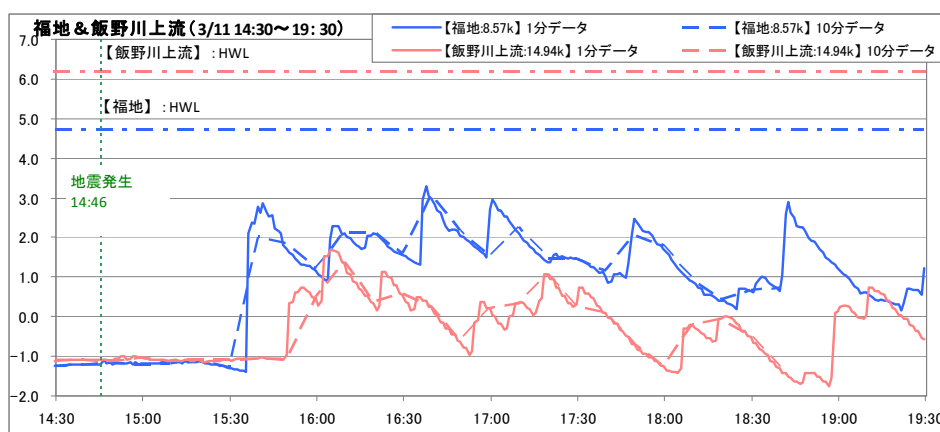


図-6.56 新北上川における津波遡上時の水位経時変化の観測結果
(東北地方整備局による観測データ)

(2) 河道内および堤内の津波痕跡水位調査結果

東北地方整備局が実施した阿武隈川、名取川、鳴瀬川および新北上川を対象とした河川周辺の津波痕跡調査の速報データを用いて、河川研究室において整理した結果を図-6.57に示す。痕跡調査では、堤防のり面をはじめ、橋梁、水門、堤内地の建設物や山裾部などで確認された痕跡の標高を測定している。今次の津波は河川堤防高を超える最大水位に達している区間があり、その区間で得られる痕跡は、上記した河川堤防より高い構造物等に限られるため、データ数が少ない。また、そうした構造物であっても水没したと推察されるもの、また山裾に津波が打ち上げられた高さ（遡上高）に相当するデータなどが速報データには含まれている。今後データを精査するとともに、津波再現計算などを併用して河川に沿った川側・堤内側の最大水位の分布を明らかにしていく必要があるが、今回図-6.57の作成にあたっては、その代わりとして現地踏査時の観察結果を踏まえて最大水位分布をごく大まかに推定した結果を「大まかな水位の変化傾向」と注書きを付した曲線として表示することとした。

堤防天端高を基準とした堤内側・川側の水位の高低の組み合わせから、河川への津波遡上状況を河口から上流に向かって図-6.58に示すように大別することができる。最も河口側では堤内・川側とも天端を超える最高水位に達する「堤防水没区間」、その上流では堤内側水位が天端高以下で川側から越水する「堤防越水区間」となる。なお、堤防水没区間であっても、最大水位に達するまでの間（例えば、(1)で述べた河道内を先行する津波

遡上が生じている間）やそれ以降において、川側または堤内側からの越水が卓越する時間帯があると推察される。これら区間より上流には、堤内・川側とも堤防天端高以下で遡上する「堤防高以下遡上区間」となる。この区間の一部では、川側水位が堤内地盤高および堤内側水位より高くなっており、すなわち河川堤防が津波遡上を河道内に留めた状況となっている。

なお、阿武隈川の亘理大橋地点では、左岸に比べて右岸側の痕跡水位が非常に高くなっている。このデータは亘理大橋の高欄に引っかかった植物を津波遡上による痕跡と判断して得たものであり、津波到達を示す痕跡としての判定の信頼性は高いと考えている。この地点で河道は下流に向かって左に湾曲しており、つまり津波遡上に対して外岸側にあたるため水位上昇が生じたと考えられる。

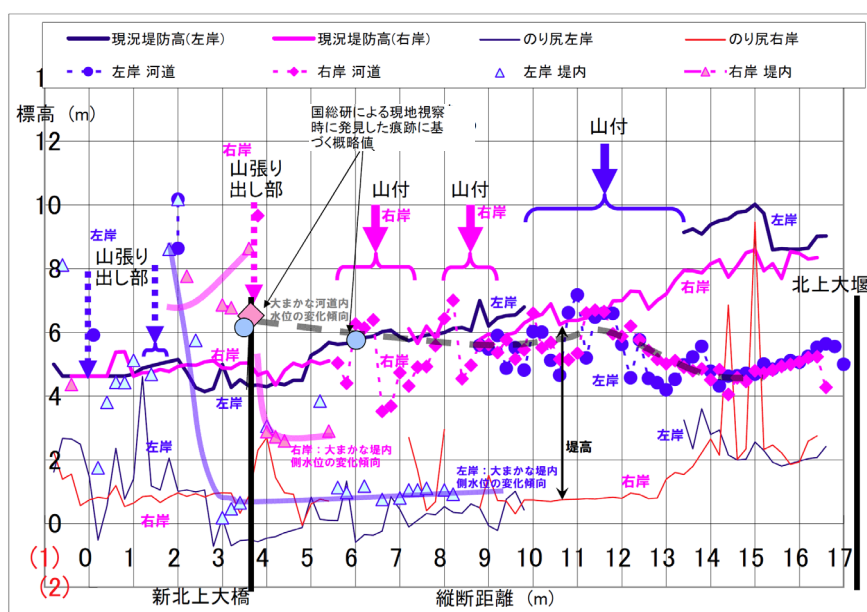


図-6.57(a) 新北上川における痕跡水位調査結果（東北地方整備局よりデータ提供）

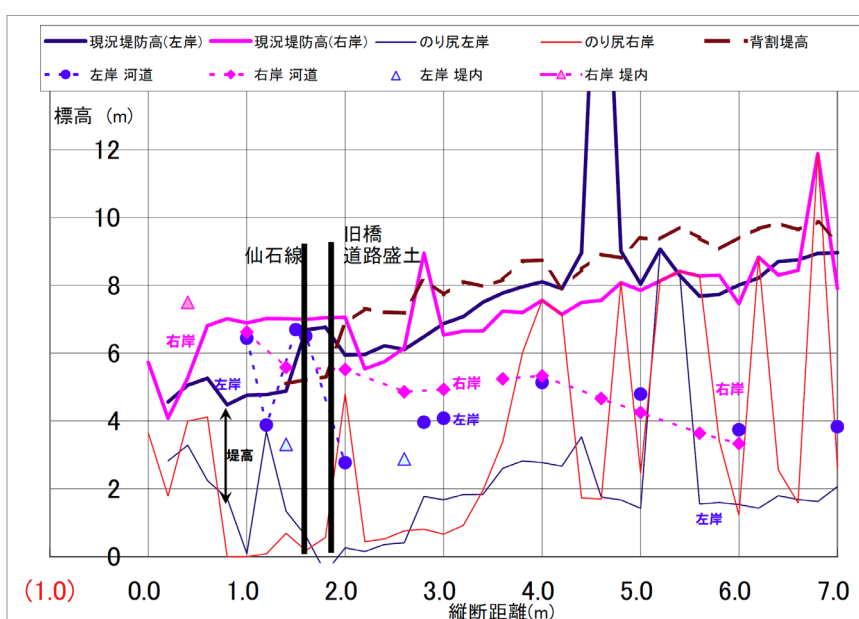


図-6.57(b) 鳴瀬川における痕跡水位調査結果（東北地方整備局よりデータ提供）

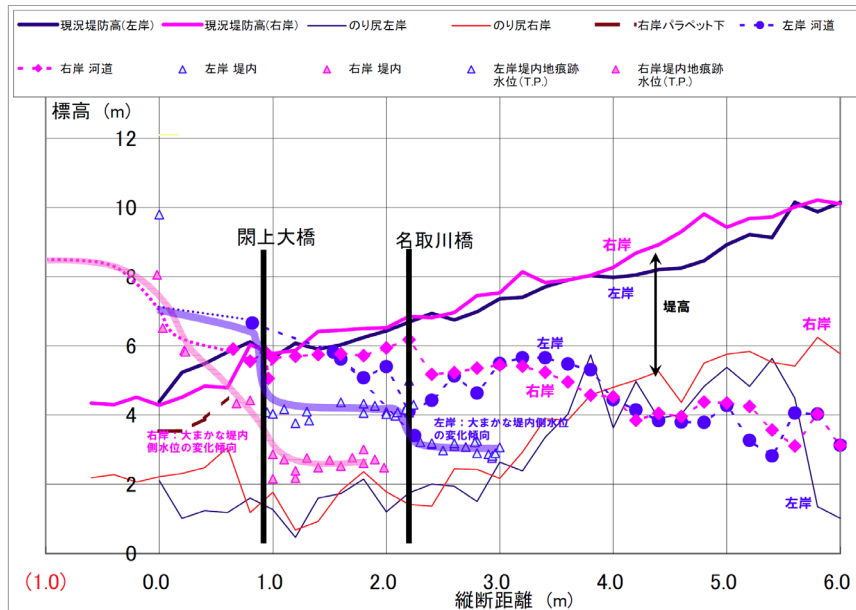


図-6.57(c) 名取川における痕跡水位調査結果（東北地方整備局よりデータ提供）

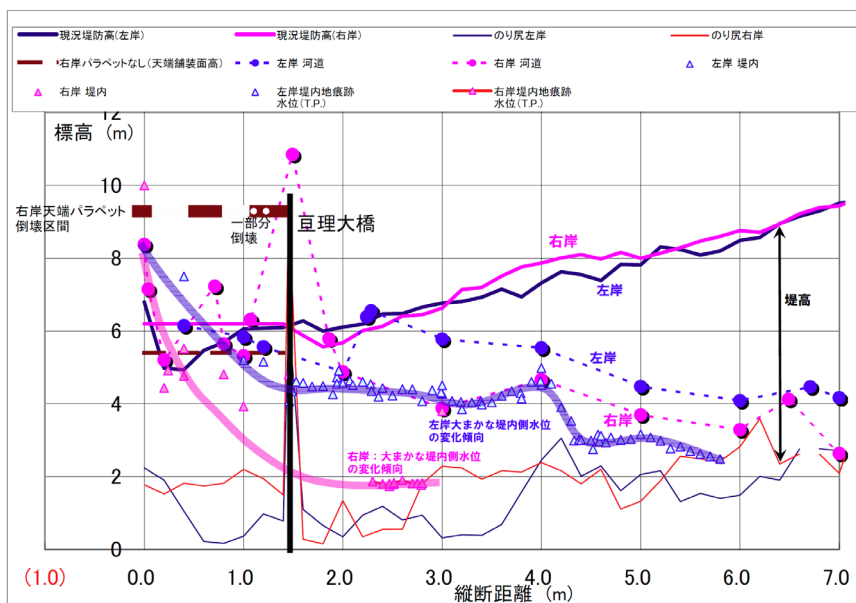


図-6.57(d) 阿武隈川における痕跡水位調査結果（東北地方整備局よりデータ提供）

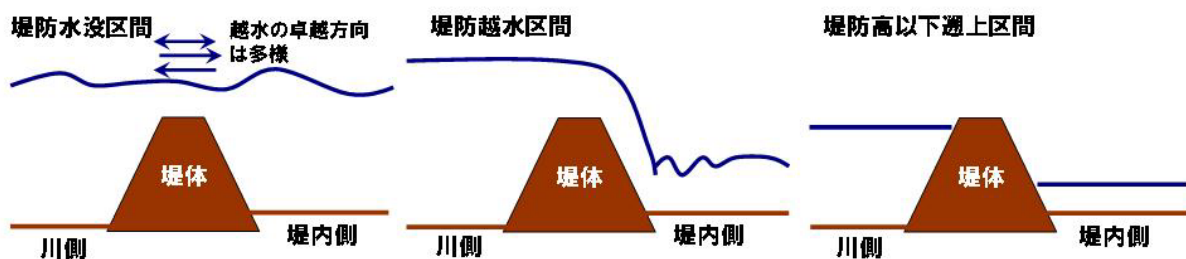


図-6.58 河川への津波遡上状況の3区分

(3) 堤防法線形状と盛土・山脚など高地部が津波遡上に与える影響

阿武隈川、名取川、鳴瀬川および新北上川の下流部の空中写真（国土地理院⁴⁾から引用）に津波遡上の流向（写真上の青矢印）と遡上状況区分（図-6.58参照）を併記したものを写真-6.108に示す。なお津波遡上の流向は、空中写真から判読した電信柱の倒伏方向または現地踏査で確認した植生倒伏や天端舗装の剥離・流送方向等から推定した。なお、堤防上の矢印は川側または堤内側への越水の卓越方向を表しており、厳密な意味での流向では必ずしもないことに留意されたい。

これら写真と図-6.57に示した痕跡水位から、津波遡上状況について以下のように整理できる。

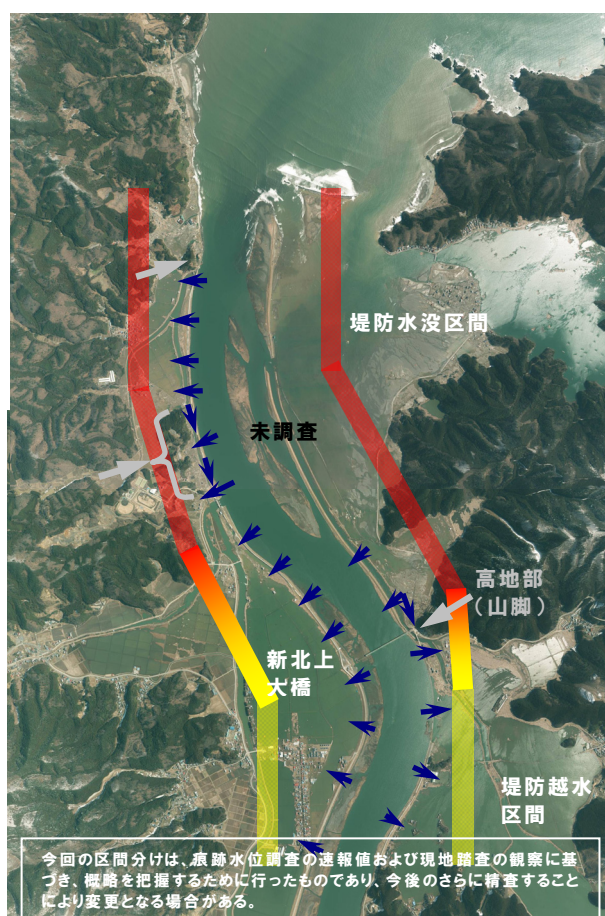


写真-6.108(a) 新北上川の津波遡上状況（空中写真は国土地理院¹⁹⁾から引用）

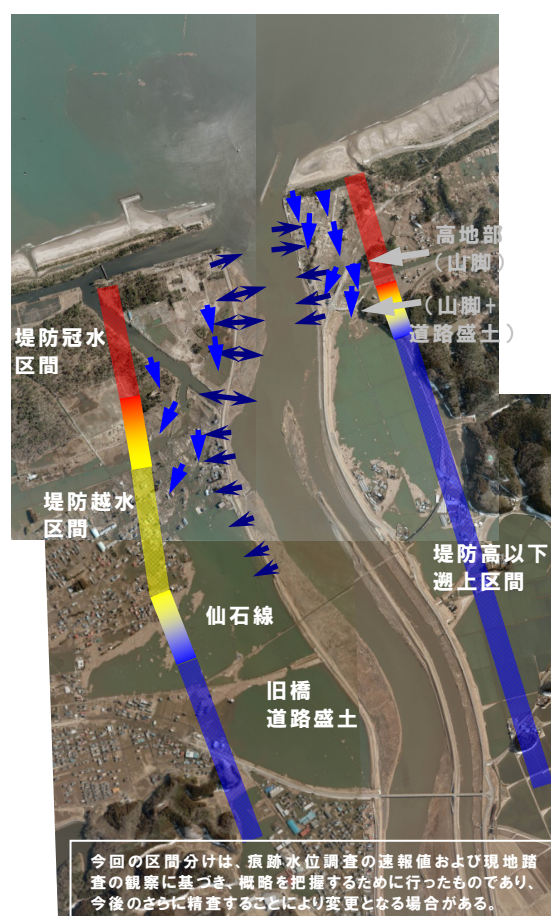


写真-6.108(b) 鳴瀬川の津波遡上状況（空中写真は国土地理院¹⁹⁾から引用）

a) 汀線に対してほぼ垂直な向きに概ね直線的に堤防が延伸する場合

これに該当する代表例として、名取川右岸および鳴瀬川左岸が挙げられる。堤防水没区間では、河川堤防を挟んで堤内・川側の両方向へ向かう痕跡が見られた。鳴瀬川左岸では、一連区間で天端舗装が川側に流送されており（6.3.2(2)参照）、一時的にある区間に渡って同一方向に堤防を越える流れが生じた可能性が考えられる。

この区間よりさらに上流に向かうと川側・堤内側とも徐々に最大水位が低下するが、

その度合いが川側より堤内側のほうが大きいため、川側からの越水を伴う「堤防越水区間」、さらに上流には「堤防高以下遡上区間」となる。

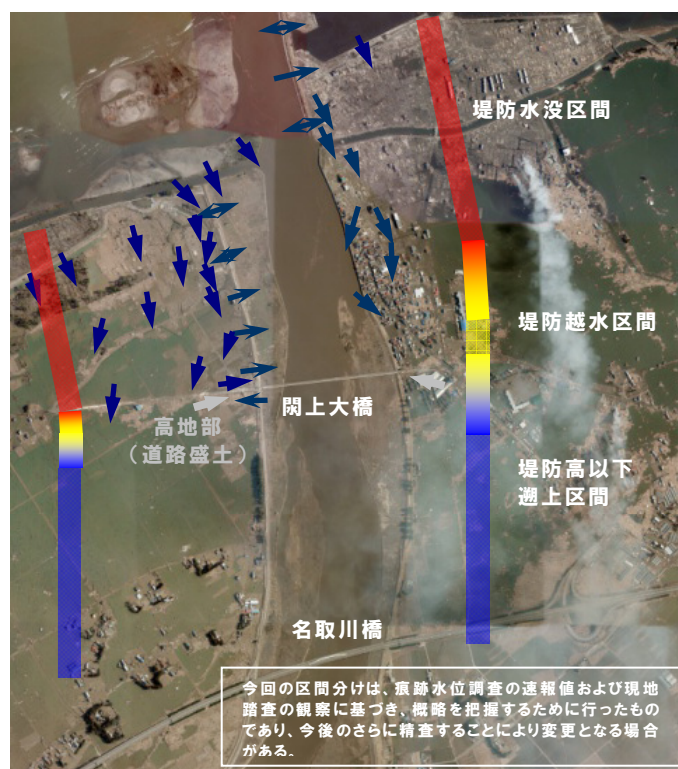


写真-6.108(c) 名取川の津波遡上状況（空中写真は国土地理院¹⁹⁾から引用）

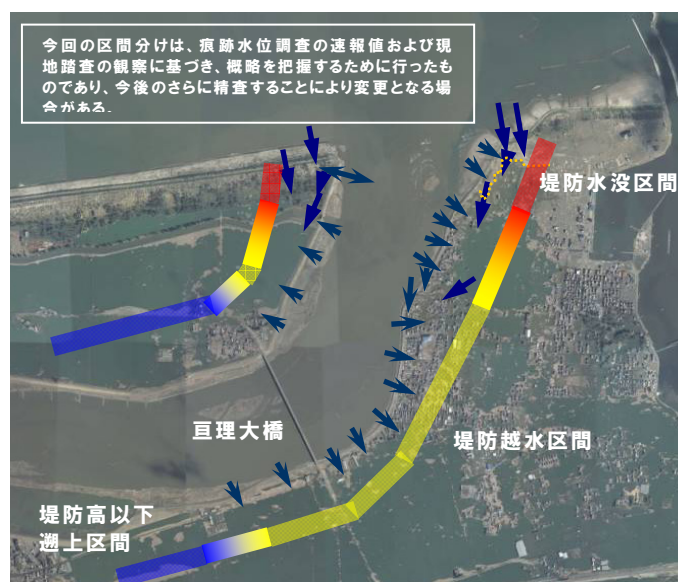


写真-6.108(d) 阿武隈川の津波遡上状況（空中写真は国土地理院¹⁹⁾から引用）

b) 盛土・山脚など高地部が a) の河川堤防に隣接する場合

これに該当する代表例として、名取川左岸および新北上川左右岸が挙げられる。名取川の場合には関上大橋の道路盛土、新北上川の場合には山脚部が堤防近傍まで接近してい

る箇所（左岸では 1.2～1.8km、右岸では 3.8km 地点：いずれとも山脚が堤防には接続せず、間に水路が通っている）である（写真-6.108(a), (c)に灰色矢印で示した）。

高地部において堤内側を遡上してきた津波がせき上げられて水位を増大させ、これが河川堤防を越えて川側へ越水したと考えられる。したがって、高地部より下流では「堤防水没区間」となるが、a)との差違は高地部の下流側近傍で川側へ向かう越水が卓越することである。

新北上川の場合、山脚部より上流では堤内側へ越水する「堤防越水区間」となった。右岸側ではこの区間内において約 400m におよぶ破堤が生じた。なお、山脚部より上流において堤防に隣接する水路に沿って遡上してきた津波が氾濫したと推察される様子が撮影されている¹⁶⁾。

名取川の場合、道路盛土より上流では堤内側の津波遡上水位が大きく低下している。これは、堤防近傍では津波が道路盛土を越水せず、堤防から離れるにともなって徐々に低くなる道路盛土を回り込んで上流に津波が遡上していった状況¹⁷⁾から、回り込みに伴う津波遡上距離の増大や流れの拡散の影響等によって波高が低減したためと考えられる。

c) 川側のり面が河口に面するように堤防が汀線に対して斜め方向に延伸する場合

これに該当する代表例として、阿武隈川右岸の河口から約 1km の範囲（湾曲部より下流の範囲）が挙げられる。この範囲では「堤防水没区間」においても、6.3.2(4)に後述するように川側から越水によるり面崩壊とのり尻での落堀形成が生じていた。また、堤防天端に設置されたパラペット上の金属製手すりには、川側からの越水を示唆する植生の集積や流送物の衝突によると推察される変形が見られた。さらに、一部パラペットが倒壊し、堤内側に流送されていた。以上の状況から、川側のり面が河口に面するように堤防法線が汀線に対して斜め方向に延伸する区間では、川側からの越水が卓越する場合があると推察される。

d) 津波遡上に対して外岸側となる堤防湾曲区間

これに該当する代表例として、阿武隈川右岸の湾曲部が挙げられる。(2)に示したように、湾曲部に位置する亘理大橋の痕跡調査から外岸側において水位の増大を示唆する結果が得られている。後藤ほか²⁰⁾による湾曲部を有する河道内の津波遡上に関する数値計算結果においても外岸部で水位増大が生じており、亘理大橋の痕跡はこうした津波波高の変化を捉えたものと推察される。

阿武隈川の湾曲部から直線河道に移行する外岸側の箇所において、津波遡上により低水護岸が流失している。新北上川においても、河道形状がほぼ同様な箇所（4.6～4.8km 地点右岸）でやはり低水護岸の流失が生じている（写真-6.109(a)参照）。なお、これら被災箇所より下流では流失には至っていない。今後、護岸構造など耐力の観点を加味して被災機構を分析する必要があるが、上記した類似性から護岸流失は湾曲外岸部における波高増加など津波の挙動と何らかの関連性があると推察される。

6.3.2 堤防等河川管理施設の被災・変状

新北上川、鳴瀬川、名取川、阿武隈川の堤防等河川管理施設の被災・変状等について、現地踏査時に確認した事項などを付した写真を以下に示す。写真-6.108 に現地踏査を実施した範囲をL-*, R-*として示すとともに、被災・変状の状況について表-6.4 に示すように定性的に分類した結果を併記した。なお、被災・変状等の写真については各範囲における代表的事例と考えられる地点のものを掲載している。

表-6.4 堤防・護岸の被災・変状の分類

	のり面の状況	表のり 津波遡上流れによる侵食が主	裏のり 越水流れによる侵食が主
	植生のり面	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	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
	植生のり面	草本植物が部分的に剥離する。剥離した部分は溝状に深く浸食される場合がある。	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。
	植生のり面	草本植物が全面的に剥がれて裸地化するのに伴い、のり面に侵食による凹部が見られる。	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。
	植生のり面	草本植物が全面的に剥がれて裸地化し、堤体土が侵食され元の平坦なのり面形状を留めない。	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。
	コンクリート護岸 特殊堤	護岸に若干の変状が見られるが、機能上大きな低下はない程度のもの	コンクリート擁壁により全面的に覆われた状態を維持。機能上大きな低下はないと判断される程度のもの。
	コンクリート護岸 特殊堤	のり覆工が捲れ上がるなど、流失した状況	コンクリート擁壁等が流失した状況
のり尻舗装		該当なし	堤防のり尻に隣接してアスファルト等の舗装されている区間

(1) 新北上川

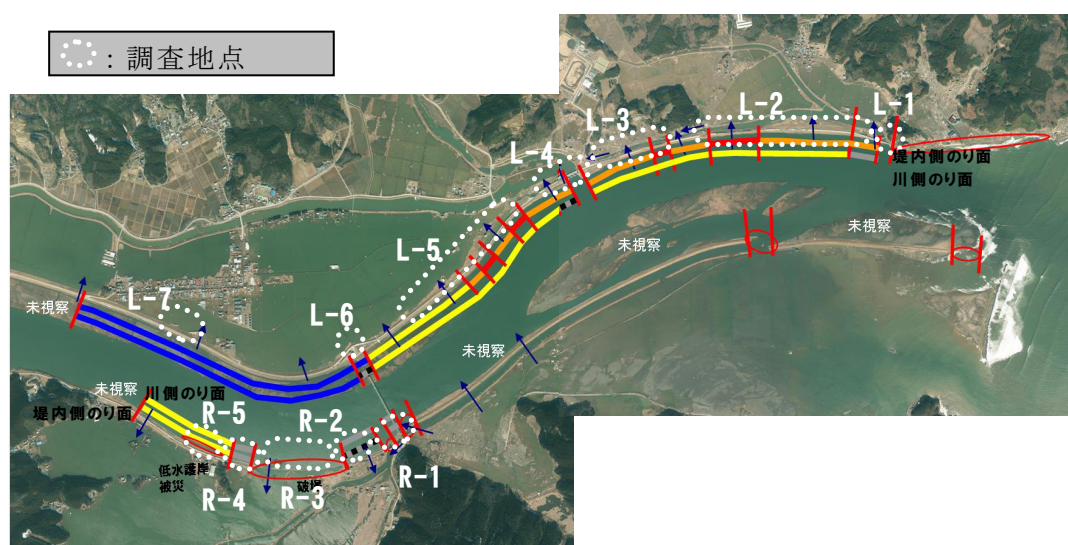


写真-6.109 新北上川における現地踏査地点と被災状況
(空中写真は国土地理院¹⁹⁾より引用)

① L-1 地点



◆堤防高を大きく上回る水位痕跡（赤丸部）



◆左写真の上流に位置する水門の被災

② L-2 地点



◆堤内側への越水によると考えられるのり面の侵食と落堀の形成



◆川側のり面：植生が剥離するとともに、筋状に堤体が侵食されていた（上流を望む）

③ L-3 地点



◆堤内側のり面の侵食：のり尻部には山脚・堤防間を流下する水路あり



◆川側のり面：筋状の侵食域（下流を望む）

④ L-4 地点



◆堤防天端際に設置された施設の損壊



◆水門脇護岸ブロックの上流へのめくり上がり



◆堤内側への越流によると考えられるのり面の侵食と落ち堀の形成



◆川側のり面の侵食：覆土下から護岸ブロックが露出

⑤ L-5 地点



◆堤内側への越流による侵食：天端が一部流失している



◆川側のり面：天端～のり肩部が侵食を受けている

⑥ L-6 地点



◆堤防天端際に設置された施設：津波遡上により側壁が損壊（地表から約 2m の高さ）



◆左写真の道路に続く新北上大橋の橋桁の流失。高欄に流送物が集積している。

⑦ L-7 地点



◆天端の水位痕跡：天端上 20cm 程度



◆堤内側のり面：越水によって植生がのり尻に向かって倒れ、溝状に堤体が侵食されていた

⑧ R-1 地点



◆L-6 地点の対岸：流下物集積から天端上 1.6m 程度まで冠水したと推定される



◆堤脚と本川堤防間を流下する水路：橋梁の前あたりで本川堤防が破堤している

⑨ R-2 地点



◆高水護岸は枠内の袋詰工が一部流失したが、コンクリート部には目立った損壊なし



◆堤内側のり面の侵食状況：下流側（写真奥）では落堀が形成されていた



◆津波遡上方向（写真左→右）に見ると、堤内側擁壁際の堤体侵食が徐々に大きくなり擁壁が転倒し、さらにその先では破堤している

⑩ R-3 地点



◆堤防の川側のり先部の道路：道路左端のコンクリートは高水護岸の基礎工。基礎工は破堤区間全長に渡って存置していた。



◆津波遡上に対して湾曲部外岸となる区間：場所によっては捨石工の打ち上げと思われる変状が見られた。

⑪ R-4 地点



◆破堤区間の上流端：護岸背後の堤体が侵食され、支えを失った護岸が折れたように見える



◆R-2 地点と同様に、擁壁近傍の天端が侵食されていた

⑫ R-5 地点



◆川側のり面：山付部では表土が流失し、岩盤面が露出



◆津波遡上に対して山付部の背後に位置する地域：堤内地の痕跡水位は堤防天端より低い。のり面には越水による損傷が認められた

(2) 鳴瀬川

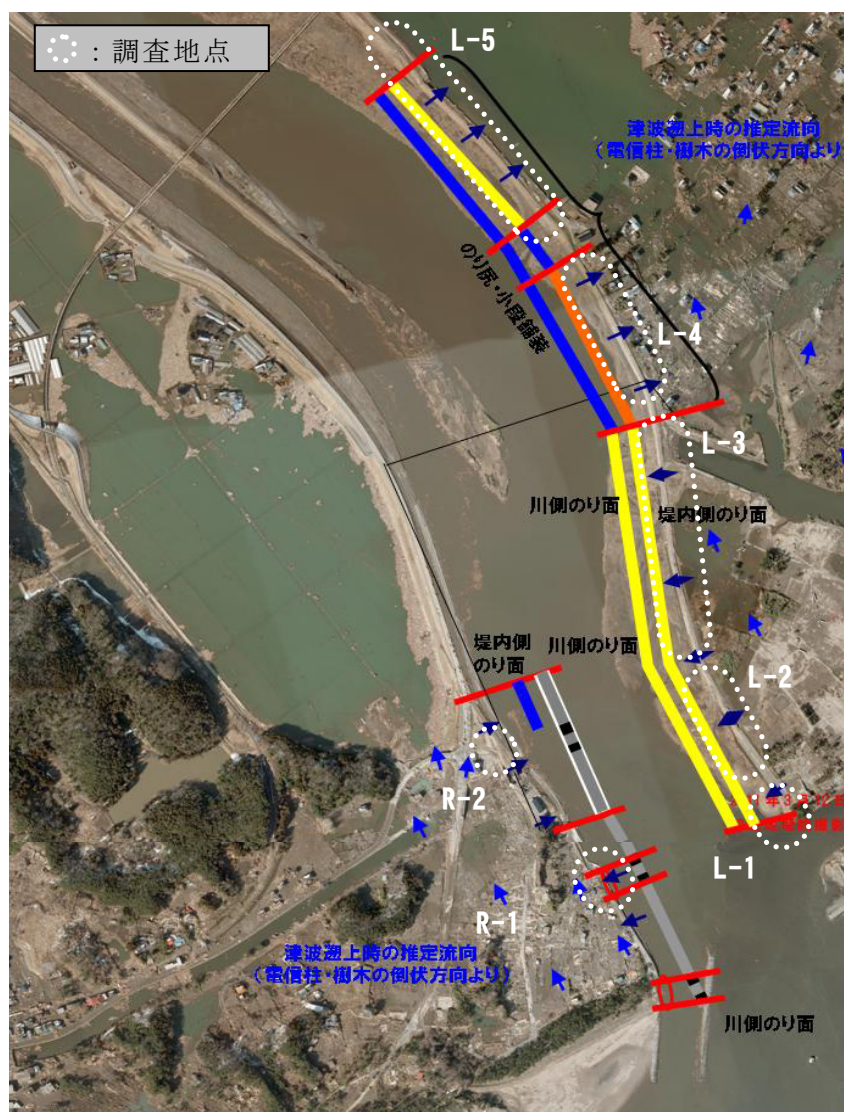


写真-6.110 鳴瀬川における現地調査地点と被災状況
(空中写真は国土地理院¹⁹⁾より引用)

① L-1 地点



◆堤防天端際に設置された施設：屋根の損壊が水位痕跡あり（天端から約2mの高さ）

② L-2 地点



◆川側のり面：のり肩部の植生が捲れ上がっていた。

② L-2 地点



◆堤内側ののり肩部の損傷。川側・堤内側とも天端付近に損傷が集中しているのが特徴的

③ L-3 地点



◆川側ののり肩部の越水によると推定される侵食

③ L-3 地点



◆剥離したアスファルト。川側に断片が流送されていた。



◆堤内側のり面には、明確な侵食による損傷や越流の痕跡がほとんど見られなかった

④ L-4地点

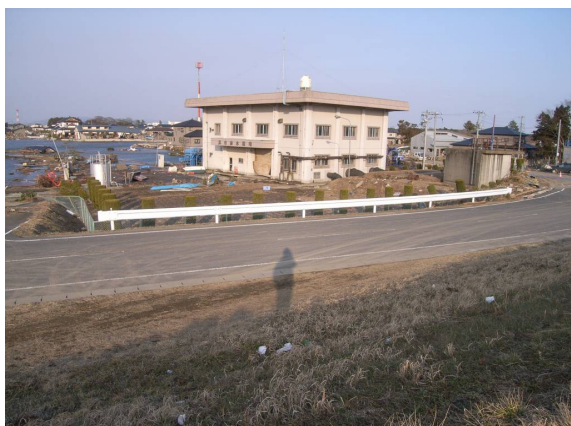


◆堤内側のり面の侵食：葉茎ののり尻に向かう倒伏と塀の倒伏状況は、川側から堤内側への越流の発生を示唆する



◆川側のり面に損傷はほとんど見られなかった

⑤ L-5地点



◆排水機場壁面の痕跡水位は堤防天端より低い



◆堤内側のり面：川側からの越水を示唆する痕跡



◆堤内側小段上の舗装の損壊とのり尻の侵食状況



◆川側のり面の2筋の水位痕跡：複数回の津波遡上が生じたことを示唆

⑥ R-1 地点



◆特殊堤の背後の侵食：一部倒壊していた

⑦ R-2 地点



◆覆土下の高水護岸が露出：天端側のブロックがのり尻側に移動（堤内側からの越水による）

(3) 名取川



写真-6. 111 名取川における現地調査地点と被災状況
(空中写真は国土地理院¹⁹⁾より引用)

① L-1 地点



◆河口市：堤防先端部分の侵食状況

② L-2 地点



◆天端舗装の剥離・流送：その下の堤体土の侵食は軽微

② L-2 地点



◆川側のり面では植生が広い範囲で剥離



◆対照的に堤内側のり面では植生に目立った損傷なし



◆川側のり面：のり尻部にのみ植生が残存



◆天端のアスファルト舗装が剥離し、川側（写真左側）へ流送されていた。

③ L-3 地点



◆川側のり面：植生がのり尻方向に倒伏しており堤内側からの越水を示唆。のり肩部のガリ状侵食は流下物の擦れによる損傷の可能性あり



◆坂路上流ののり面では、他の箇所比べて損傷が著しかった

③ L-3 地点（坂路より上流）



◆川側のり面



◆堤内側のり面

◆両のり面とも坂路より上流では特段の損傷は認められなかった

④ L-4 地点



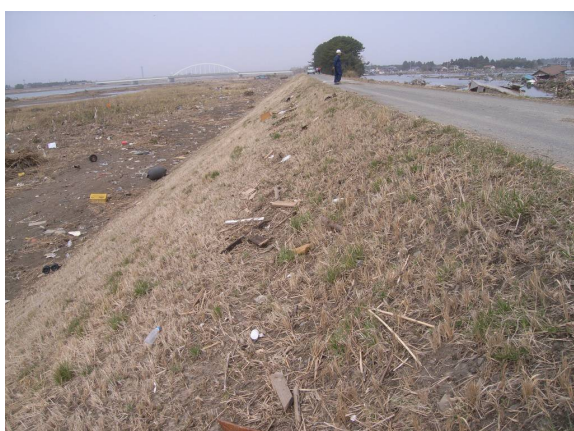
◆堤内側の津波遡上が道路盛土に阻まれて、川側に越水。その際に流送物が堤防に乗り上げる。

⑤ L-5 地点



◆道路盛土上流では、川側から堤内側へ越流（写真左のガードレール上の痕跡から）

⑤ L-5 地点



◆川側のり面：特段の損傷は認められない。



◆堤内側のり面：天端すぐ下のり面には越水の痕跡あり。堤内側の痕跡水位は小段高さ程度

⑥ L-6 地点



◆川側のり面：特段の損傷は認められない。
痕跡も不明確



◆堤内側のり面：堤内側の痕跡水位は小段高さ程度

⑦ R-1 地点



◆川側のり面：護岸ブロックが上流（写真手前側）に向かって捲れ上がる（4/24 現地視察）



◆堤内側のり面：特段の損傷は認められなかった（4/24 現地視察）

⑧ R-2 地点



◆特殊堤の背後の地盤が洗掘されていた（4/24 現地視察）



◆左写真の下流側：洗掘は広い範囲におよぶ（4/24 現地視察）

⑨ R-3 地点



◆堤内地の地盤高が左岸に比べて高い→津波による家屋流失を免れた一つの要因と考えられる：川側からの越水が顕著



◆川側の状況：遠目からでは特段の損壊は見られなかった



◆堤内側のり面：越水による植生の倒伏：家屋にも越水によると思われる損壊が見られた



◆川側のり面：部分的に植生が剥離：根茎が露出する

⑩ R-4 地点



◆堤内側のり面：植生の倒伏は明瞭でない（越水があったとしても、水深はごく小さいと推定される）



◆堤内側のり面の痕跡水位：川側に比べて水位が低いと想定される

⑩ R-4 地点



◆護岸天端部での植生のめくれ上がり：ほぼ堤防満杯で遡上した津波が橋桁でせき上げられて越水したと推定される。

⑪ R-5 地点



◆川側のり面：小段上に水位痕跡

⑪ R-5 地点



◆堤内側では冠水の痕跡なし（地盤高が高いためと推定される）

⑫ R-6 地点



◆川側ではのり尻近傍に水位痕跡あり

⑫ R-6 地点



◆堤内側も同様にのり尻近傍に水位痕跡あり

(4) 阿武隈川

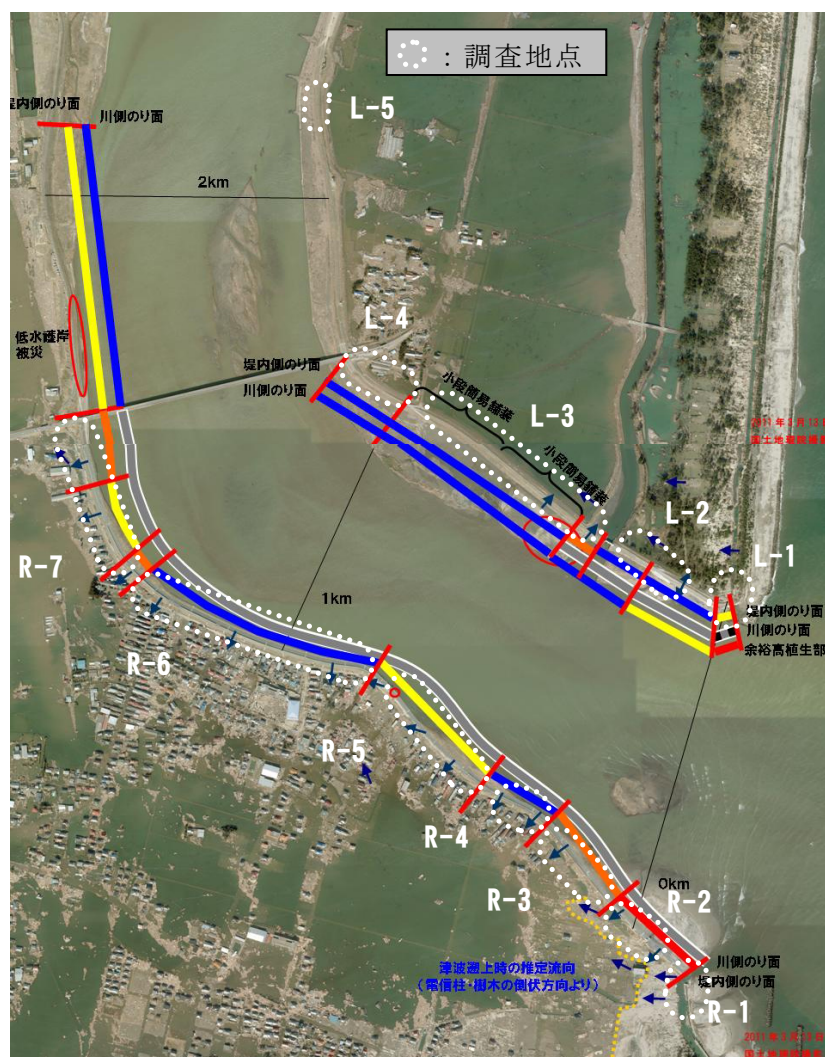


写真-6. 112 阿武隈川における現地調査地点と被災状況
(空中写真は国土地理院¹⁹⁾より引用)

① L-1 地点



◆河川堤防に接続する海岸堤防の被災：裏のり側から内部の土砂が抜け出してコンクリート枠がつぶれるように倒壊



◆河川堤防：堤内側からの越水により損壊：根固ブロックも一部流失

② L-2 地点



◆川側のり面



◆堤内側のり面

◆両のり面とも越水によると考えられる侵食や植生の倒伏が見られた



◆上写真のさらに上流：のり肩部の侵食から天端は冠水していたと推察される



◆堤内側のり肩で路面上の植生の捲れ

③ L-3 地点



◆水門脇の護岸の陥没：地震動に起因するものと推察される



◆川側のり面：特段の損傷は見られなかった

③ L-3 地点



◆堤内側のり面には越水による植生の倒伏・侵食が見られた。小段上の舗装が剥がれ、のり尻に流送・堆積していた。

④ L-4 地点



◆工事看板の倒伏や杭への流送物の集積状況から川側（写真右）から越水と推定（天端から 20cm 程度の水位）

④ L-4 地点



◆堤内側のり面には越水による侵食・植生の倒伏が見られた。痕跡水位は小段上程度。

⑤ L-5 地点



◆川側のり面：痕跡水位は天端より低い（越水なし）

⑤ L-5 地点



◆堤内側のり面：痕跡水位は小段より低い（川側のほうが高い）

⑥ R-1 地点



◆河川堤防と海岸堤防が接合する隅角部での破堤

⑦ R-2 地点



◆越水による土堤部の侵食状況：のり肩のパラペットが流失。天端まで侵食が及ぶ



◆樋門足場に水位痕跡（天端から 1.5m 程度）

⑦ R-2 地点



◆天端が完全に流失：深い落堀が形成



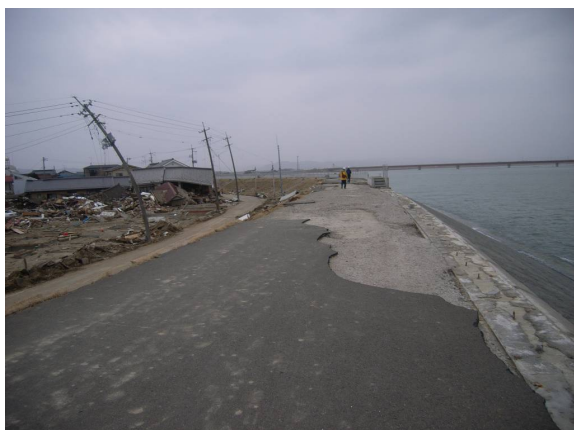
◆パラペットは流失せず、手すりに痕跡が見られる：越水によるのり面侵食と落堀形成

⑨ R-4 地点



◆パラペットの手すりに痕跡ほとんどなし：のり面の侵食が軽微、落ち堀は見られない（R-2→R-3→R-4と越流による堤防の侵食の程度が徐々に小さくなる傾向が見られる）

⑩ R-5 地点



◆一連区間でパラペットが流失し、天端アスファルトも剥離・流失



◆越流によるのり面侵食と家屋損壊

⑪ R-6 地点



◆のり面の侵食は比較的軽微

⑫ R-7 地点



◆一連区間でパラペットが流失し、のり面の侵食も発生。

⑫ R-7 地点



◆のり面の侵食状況：R-6 に比較して侵食が進行している。のり尻部では舗装によって洗掘が抑制されたと考えられる



◆河口を望む。津波の作用によると考えられるのり尻捨て石の打ち上げ。

6.3.3 河川堤防・護岸の被災の特徴

本項では、河川堤防と護岸を対象として、津波遡上時の水位や流向と被災の形態や程度との関連性の観点から、新北上川、鳴瀬川、名取川、阿武隈川に共通していると考えられる特徴、および個々の事象を組み合わせることで全体を俯瞰することで引き出せる現時点での現象の解釈について整理して示す。

写真-6.109～写真-6.112 に示した各河川の被災状況（定義については表-6.4 参照）を痕跡水位と併せて整理した結果を図-6.59 に示す。以下の議論では、本図とともに 6.3.2 に示した個別箇所での被災状況を併せて参照されたい。なお、以下の文中に示す「河川名 [L-*又は R-*]」は 6.3.2 に示した各河川の調査地点と対応している。

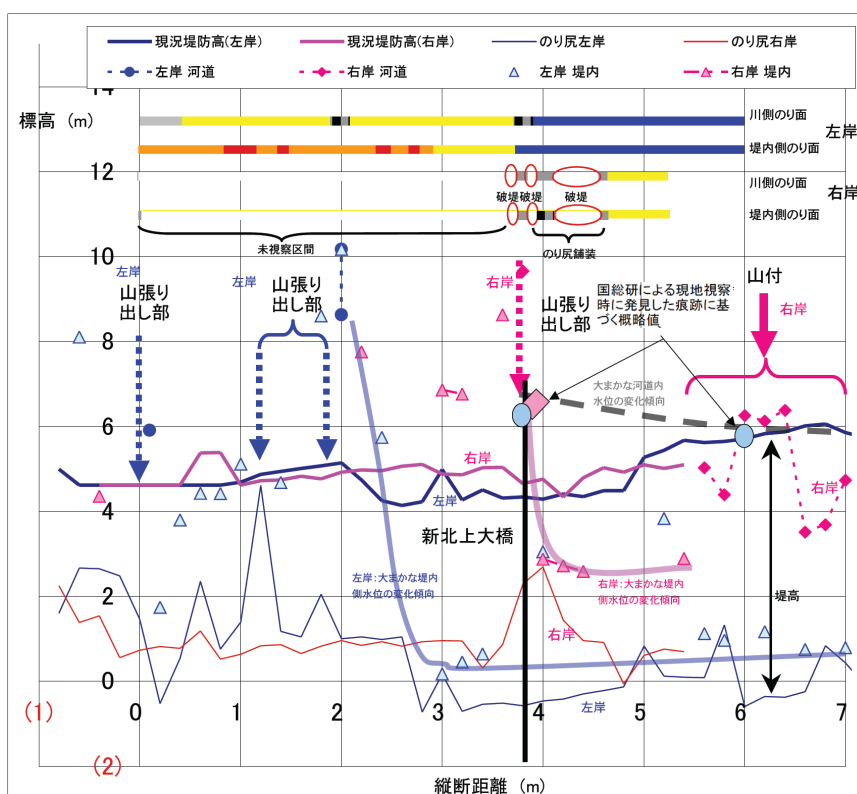


図-6.59(a) 新北上川における痕跡水位と被災状況の縦断分布
(痕跡水位・堤防等諸元は東北地方整備局よりデータ提供)

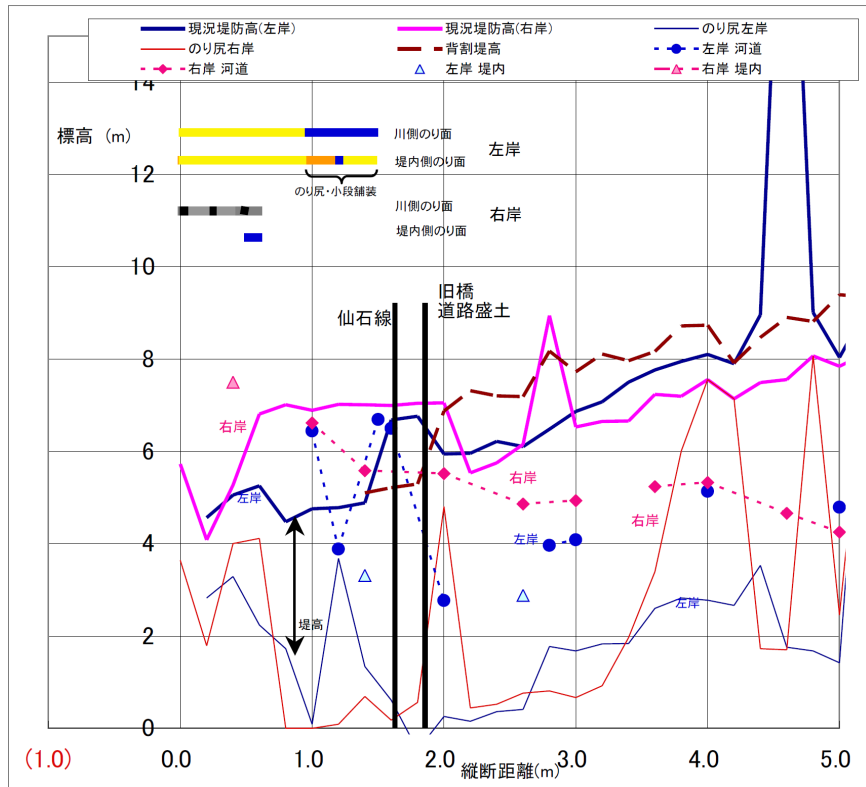


図-6.59(b) 鳴瀬川における痕跡水位と被災状況の縦断分布
(痕跡水位・堤防等諸元は東北地方整備局よりデータ提供)

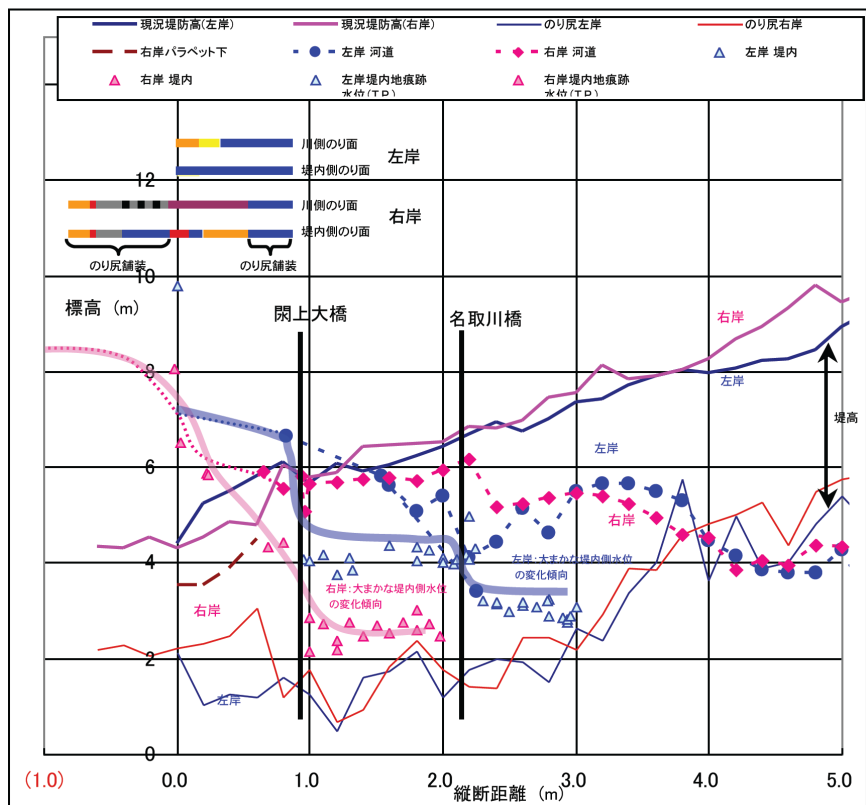


図-6.59(c) 名取川における痕跡水位と被災状況の縦断分布
(痕跡水位・堤防等諸元は東北地方整備局よりデータ提供)

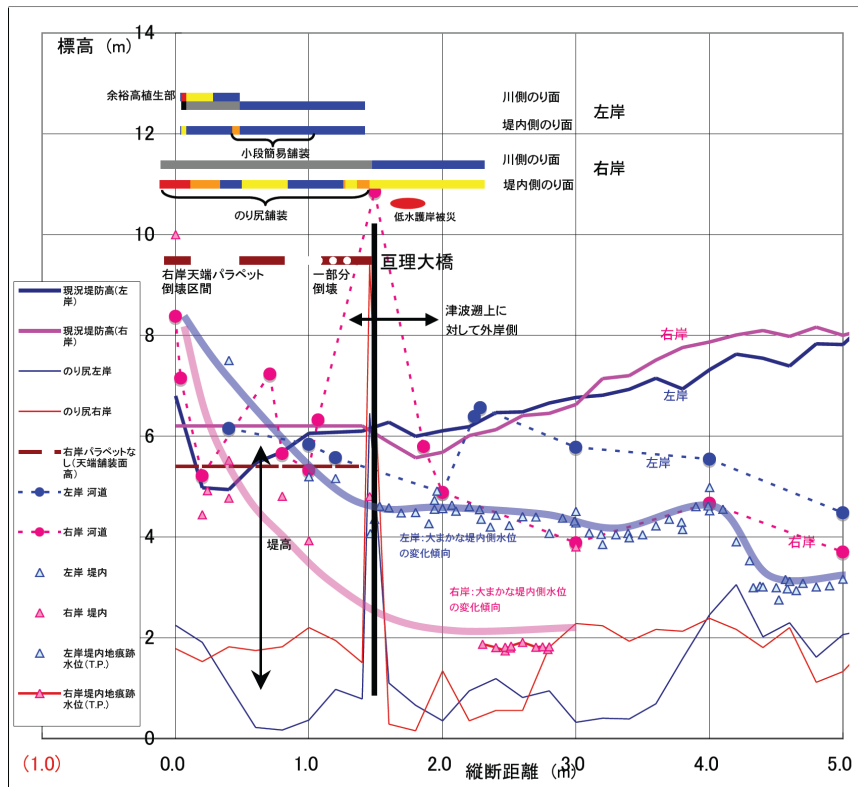


図-6.59(d) 阿武隈川における痕跡水位と被災状況の縦断分布
(痕跡水位・堤防等諸元は東北地方整備局よりデータ提供)

(1) 破堤地点

破堤に至った地点は、「堤防水没区間」または「堤防越水区間」に分類される津波遡上が生じた区間であり、かつ①河口部の海岸堤防と接続する隅角部とその周辺、②特殊堤区間、および③河道が湾曲しているなどのため河口から遡上してくる津波に対して川側のり面が向かい合う形になる区間に位置していた。③に分類される阿武隈川[R-2]は、①に該当する破堤区間[R-1]に隣接するとともに、破堤には至らなかったものの、越水による侵食で堤内側のり面が堤防天端を切り欠く程度まで進展した区間である。こうした状況から、③については越水による侵食を糸口として破堤機構について検討することが考えられる。これについては後述(2)を参照されたい。①、②については、被災状況の観察のみからでは破堤機構の推察が困難であった。今後、被災前の堤防構造や河口部での津波の挙動などについて精査し、検討を進める必要がある。

(2) 土堤部の越水による被災

堤内側への越水流れによると推定される堤体の侵食や基礎地盤の洗掘（落堀）は、上述したように破堤地点近傍でも確認されており、例えば新北上川[L-2, L-4, L-5]や阿武隈川[R-2, R-3]のように堤体断面を大きく減じるものがあつたことから、破堤に次いで程度の大きな被災の一形態と考えられる。これら堤防天端を切り欠く程度（表-6.4の凡例で赤およびオレンジ区分）の侵食が生じた地点では、痕跡水位から堤防天端で最大1m程度またはそれ以上の冠水が生じたと推察される。図-6.56に示した津波遡上時の水位変動に見られる急激な水位上昇、および河道内の津波遡上が堤内に先行して生じることを併せて考

えると、上記のような冠水深に近い越流水深での堤防越水が生じていたと考えて良いであろう。このような強い越流を受けながら破堤に至らなかった要因については、痕跡水位や越水時を捉えた写真などに基づいて推定される津波越水の状況から、以下のように推察される。

①「堤防水没区間」に位置する新北上川[L-2, L-4]、阿武隈川[R-2]

一つの要因として、図-6.60 に模式的に示すような堤内側の水位の急上昇が考えられる。新北上川の場合、氾濫原は山間の平地であり、そのため堤防から山地斜面までの距離、すなわち平地の幅が狭いこと（特に下流側の山付部近傍）、そこに大きな越流水深での大量の越水が一時に生じたため、さらに堤防際の水路を遡上してきた津波の氾濫がそれに加わったため、堤内地の水位が急上昇したと考えられる。この様子は新北上川[L-4]の津波の堤防越水開始から堤内地が浸水していく状況を時系列的に撮影した写真¹⁶⁾で確認できる。また阿武隈川[R-2]の場合は、河口にごく近いため、海岸堤防を越えて遡上してきた津波によって、堤内側の水位が急上昇した可能性が考えられる。

これら堤内側のり尻近傍の水位急上昇が堤防のり面の侵食進行を抑制するウォータークッションとしての効果が発揮するとともに、1m を越えるような激しい越水をクッション効果なしで受ける状況をごく短時間に留めたことが、破堤に至らなかった要因の一つであると推察される。阿武隈川[R-2]の場合には、天端まで設置された川側のり面のコンクリート護岸が、天端から川側のり面への堤体侵食の進行を抑制したことも、要因として加えられよう。

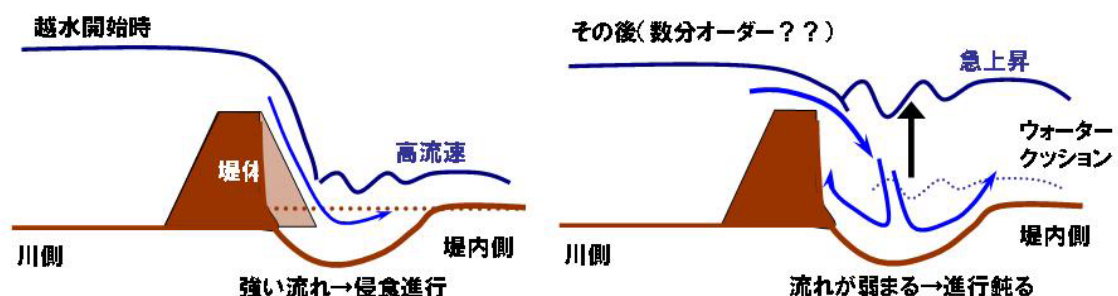


図-6.60 津波の堤防越水に伴う堤内側の水位急上昇による侵食進行の抑制イメージ

②「堤防越水区間」に位置する新北上川[L-5]、阿武隈川[R-3]

越流水深は「堤防水没区間」に比較して概して小さいこと、さらに堤防天端の冠水には至らないものの堤内側において水位上昇が生じてウォータークッションの効果が発揮されたことにより、侵食の進行が抑制され、破堤には至らなかったと推定される。

また、痕跡水位によると堤内のり尻近傍の水深が比較的小さい阿武隈川[R-4～R-7]では、上記①、②に比較して堤内側のり面の侵食の程度は[R-7]を除いて軽微である。これは「堤防越水区間」であるものの越流水深が小さいこと、さらに越水の継続時間が比較的短時間であったためと推察される。その時間の大きな目安となるのは図-6.56 に示した津波遡上時の水位変動であり、これによると約 30 分程度の間で水位が急上昇したのち下降に転じて低下している。また、のり尻や小段面がアスファルト等による舗装がなされて

いた場合、場所によっては落堀の形成を防止・緩和していると思われる箇所があった。これらが相まった効果によって、侵食が比較的に軽微になったと推察される。

なお、阿武隈川[R-7]は湾曲部外岸側に位置していたため、痕跡水位によると河道内の水位が高くなっており、そのため[R-4～R-6]に比較して大きく侵食されたと考えられる。

図-6.61 に阿武隈川右岸の痕跡水位と堤防被災程度の縦断分布に、天端パラペットの流失区間、および堤防のり面が津波遡上を受けるように河口に対して「斜め」を向いているかまたは「沿う」方向であるかの区分を併記した。これによると、パラペット流失は主に「斜め」の区分で生じており、そこではパラペットの高さの分だけ越流水深が大きくなったため堤内側のり面の被災程度が大きくなる傾向が見られる。

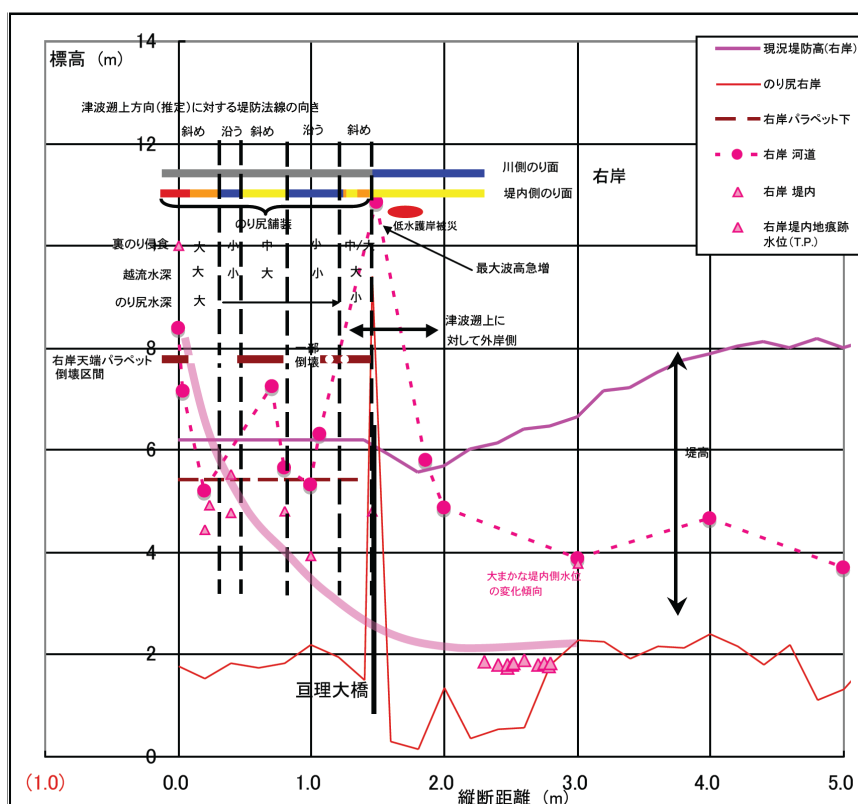


図-6.61 阿武隈川右岸の痕跡水位と堤防被災程度の縦断分布
(痕跡水位・堤防等諸元は東北地方整備局よりデータ提供)

以上より、越流によるのり面侵食の被災（破堤を含む）について検討するにあたって、津波遡上に関わる事項として「越流水深の大きさ」、「堤内側のり尻の水深（ウォータークッションの効果）」、「越流の継続時間」について着目し、比較することが重要であると考えられる

なお、堤内側から川側に越水した区間（名取川[L-2～L-4]）では、川側のり面に越流による侵食が見られた。ただし、侵食はのり肩部など堤防上部で顕著であり、落堀は見られない、または不明瞭であった。この理由として、河川内の津波遡上が堤内側より先行して生じるため、堤内側からの越水が生じる段階では、川側はある程度水位が上昇しており、これが図-6.60 と同様に越水を減勢するウォータークッションとしての効果を発揮したた

めと推察される。

(3) 河道内の津波遡上流れによる堤防のり面の侵食

河道内を津波が遡上する際の流れの作用による土堤の川側のり面の損傷で最も著しいものは、全面的に植生が剥離し、堤体土まで侵食が及んだものである（例えば名取川[L-2]、新北上川[L-2]）。しかし、(2)の越水による侵食に比べると、侵食の程度は概して軽微であり、川側からの侵食によって堤防断面が著しく減じた地点は認められなかった。

植生の剥離は「津波水没区間」で多く見られ、「堤防高以下遡上区間」ではほとんど生じていなかった。これは天端の冠水・非冠水といった水位の差違によるものではなく、前者は河口に近いためある程度流速が速く、その継続時間も長めである箇所であったためと推察される。

直轄区間のように毎年草刈りを実施している堤防のり面の場合、植生の耐侵食性の発揮機構²¹⁾は、侵食の進行に伴って地表面に洗い出された地表面近傍の植生の根や地下茎が流水の抵抗となり、地表に作用する侵食力が低減されるためと考えられている。しかしながら図-6.62に示すように徐々に侵食が進行するため、ある一定の侵食深に達すると植物が根とともに剥離してしまうため、植生の耐侵食性が失われる。この剥離が生じるまでの時間が流速の増加に伴って小さくなることが実験によって確かめられている。

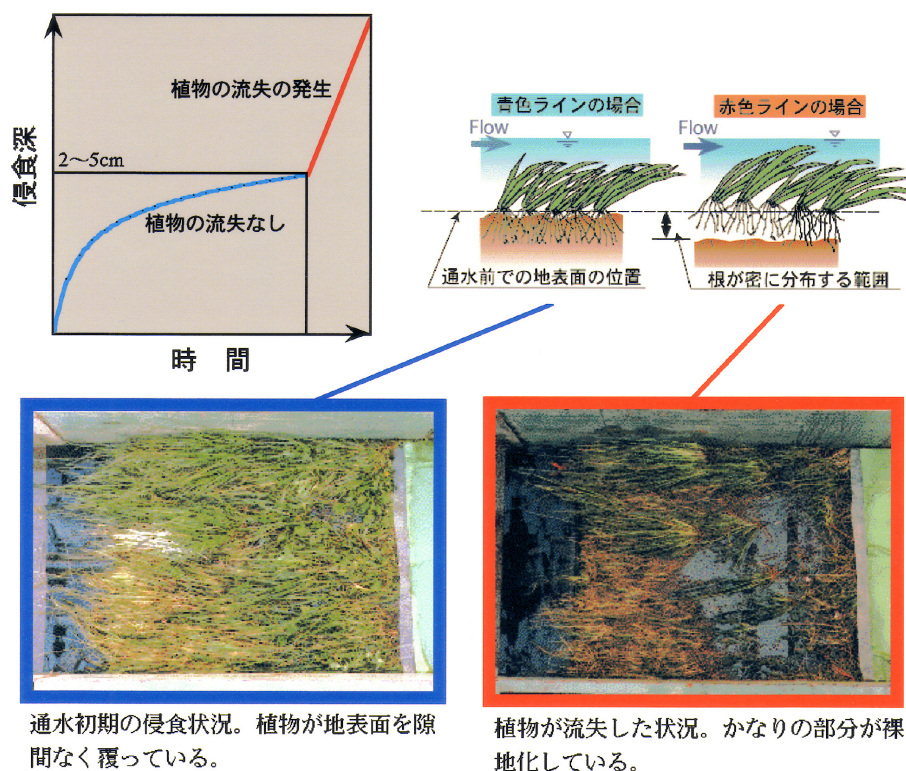


図-6.62 植生に被覆されたのり面の侵食進行に伴う植生の剥離²¹⁾

このような機構を考慮すると、津波遡上のようにある程度流速が速い場合でもその継続時間が短ければ、植生によって十分に侵食防止が可能であると考えられる。名取川[L-2]、新北上川[L-2]では、その条件を越えて植生が全面的に剥離したと考えられるが、堤

体が溝状に凹んだ程度の比較的軽度の侵食で留まったのは、のり面が粘着性を有する材料で構成されていたことから、流水に対して耐侵食性を発揮したためと推察される。

以上より、今次の大規模な津波に対して植生が侵食されたかどうかという単純な事実関係の整理のみではなく、外力との耐力の兼ね合い、すなわち津波によっては比較的短時間の外力作用となる場合があり、その場合、どの程度までの流速であれば植生の耐侵食力で侵食防止できるか、上記の発揮機構に基づいて検討を行うことが、他河川を含めた津波に対する堤防安全性評価に繋げていく上で重要と考える。

(4) 護岸の被災

現地踏査時に目視により確認した津波遡上流れによる堤防のり面上の護岸（高水護岸）の被災（新北上川[L-4]、名取川[R-1]）は、いずれも水門に隣接する護岸ブロックのめくれ上がり・流失であった。その他、阿武隈川[R-5]におけるのり覆工の変形（空中写真の赤丸部：原因不明）、鳴瀬川[R-2]における堤内側からの越水によるブロックのめくれ上がりが見られた。

低水護岸については、水面上から見える範囲の確認に留まるが、新北上川および阿武隈川の湾曲部上流地点で低水護岸の崩落（写真-6.109(a), (d)の赤丸部）が生じていると思われる。その他の軽微なものとして、やはり湾曲部外岸における捨石工の打ち上げ（新北上川[R-3]、阿武隈川[R-7]）が見られた。これら被災状況は、湾曲外岸部における波高増加など津波の挙動と何らかの関連性があると推察される。湾曲部の津波の挙動については、水位のみでなく構造物の安定性に関わる流体力の観点からも検討することが必要であろう。

(5) 流送物の衝突による損傷

津波遡上時に流送されてくる樹木やがれきなど流送物が接触することにより生じたと思われる堤防等の損傷が散見された。阿武隈川[R-3]におけるパラペット上の金属製手すりの折れ曲がりや折損、名取川[L-3, L-4]における堤内側からの越水に伴うがれきによる擦れが原因と考えられるのり面の溝状の損傷などが挙げられる。また、新北上大橋の脇に流れ着いていた流木（新北上川[R-1]）は、その大きさや量から流送物の接触のインパクトを推し量ることができよう。

津波遡上に対する対策の検討（例えば集積による水位上昇に対する堤防高の余裕や接触に対する構造物の応答）において、流送物に対する配慮の必要性について考えてみる必要があると思われる。

6.4 まとめ

本章では、東北地方太平洋沖地震による河川施設の被災状況について、地震動の影響、津波の影響の観点から、現地調査等に基づく特徴的な被害の状況について報告するとともに、被災パターンの分類、被災原因に関する考察を行った。

津波による河川施設の被害については、新北上川、鳴瀬川、名取川および阿武隈川を対象に津波遡上の水位（川側と堤内側）や流れの向きについて整理するとともに、それと関連づけて堤防等の被災の形態や程度について検討した。結果として得られた主要な事項を以下に示す。

- (1) 河川周辺の堤内陸域への津波遡上に先行して河道内を遡上すること、その遡上状況を河道法線形と盛土・山脚など高地部の配置によって4パターンに分類した。
- (2) 破堤について被災の程度が大きい被災形態は越水による堤内側のり面の侵食であり、河道内の津波遡上に伴う流れによる川側のり面の侵食では、概して堤防断面を大きく減じるような被災には至っていなかった。
- (3) 約1mを越えると推定される越水を受けながら破堤に至らなかった一つの有力な要因として、のり尻およびのり面の侵食進行を抑制するウォータークッションの効果を発揮するとともに、越水をクッション効果なしで受ける状況をごく短時間に留めたと考えられる堤内側のり尻近傍の水位急上昇が考えられる。
- (4) 洪水流に対する堤防植生の耐侵食力の発揮機構に関する既往知見を適用して、高流速であってもその継続時間が短い津波遡上の場合には、現地調査で確認されたように植生によってもそのり面侵食が抑制できる場合があると考えられる。また、植生が全面的に剥離した区間において、比較的軽微な侵食で留まったのは、堤体土自体も粘着性があり、相応の耐侵食力を有する材料であったことも要因の一つであると考えられた。

参考文献

- 1) 国土地理院：治水地形分類図
- 2) 建設省土木研究所：1978 年宮城県沖地震災害調査報告，土木研究所報告，No.159，1983.3.
- 3) 建設省東北地方建設局：1978 年宮城県沖地震災害報告書，1979.11.
- 4) 金子正之，田村圭司，佐々木康，勝山明雄，佐藤謙司：平成 5 年釧路沖地震による河川堤防被害について，第 29 回土質工学研究発表会講演集，pp.973-974，1994.
- 5) 佐々木康：堤防の地震災害と災害軽減工学，JICE REPORT，Vol.9，pp.85-96，2006.3.
- 6) (財)北海道河川防災研究センター：平成 15 年十勝沖地震河川災害調査検討会報告書，2004.3.
- 7) 鳴瀬川堤防委員会，国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所：宮城県北部地震に伴う鳴瀬川堤防被災メカニズムの検討 報告書，2005.3.
- 8) 関沢元治，佐藤伸吾，中山修，鈴木義友，勝山明雄，小松田孝寿，杉浦達也，太田史郎，平塚智幸：宮城県北部地震による河川堤防被害調査について，河川技術論文集，No.10，pp.261-266，2004.
- 9) 折敷秀雄，佐々木康：液状化により被災した河川堤防の地盤改良を併用した復旧，土木学会論文集，No.686，pp.15-29，2001.9.
- 10) 佐々木康：河川堤防の地震被害，土と基礎，Vol.28，No.8，pp.25-30，1980.
- 11) 河川構造物地震対策技術検討委員会：河川構造物地震対策技術検討委員会報告書，1996.
- 12) 国土交通省国土政策技術総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震土木施設災害調査報告，土木研究所報告，No.203，2006.1.
- 13) 松尾修，日下部毅明，上原浩明，関沢元治，佐藤伸吾：2003 年宮城県北部地震における締固め改良地盤での地震動・間隙水圧記録，第 59 回土木学会年次学術講演会講演概要集，I-775，pp.1547-1548，2004.
- 14) Takahashi, A. & Sugita, H. : Behavior of SCP-improved levee during 2003 Miyagiken-Hokubu Earthquake, IS-TOKYO, Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, pp.177-184, 2009.6.
- 15) 片岡正次郎，谷本俊輔，中島進，松橋学，高宮進：観測記録に基づく河川堤防の地盤改良効果の検討，第 13 回日本地震工学シンポジウム，2010.11.
- 16) 国土交通省東北地方整備局：北上川等堤防復旧技術検討会資料，http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/taiheiyuokijishinn/kenntoukai/shiryou2_1.htm
- 17) NHK：津波の様子（宮城県名取市），<http://www3.nhk.or.jp/news/jishin0311/>
- 18) 国土交通省東北地方整備局：災害調査ヘリコプターからの津波遡上状況ビデオ映像
- 19) 国土地理院：http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html
- 20) 後藤智明，首藤伸夫：河川津波の遡上計算，第 28 回海岸工学講演会論文集，pp.64-68，1981.
- 21) 宇多高明・望月達也・藤田光一・平林桂・佐々木克也・服部敦・藤井政人・深谷渉・平舘治：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動－流水に対する安定性・耐侵食性を判断するために－，土木研究所資料，第 3489 号，1997.