

特集：東日本大震災の津波災害とその復旧復興にむけて

津波による堤防等河川管理施設の被害

服部 敦* 福島雅紀**

1. はじめに

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。本報では、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。とりまとめにあたっては、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。したがって、以下の内容は現時点での解釈を示した速報と位置付けられるものであり、今後の検討の進展に応じて適宜確認するとともに改める対象となりうる事項を含むことに留意されたい。

2. 河道内および河川近傍の堤内地における津波遡上

2.1 河道内の津波遡上の概況

名取川への津波第1波目の遡上状況を捉えた映像¹⁾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。

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-1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。下流側の福地観測所では1波目の津波遡上時に数分で約3mといった急激な水位上昇が生じている。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。

2.2 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-2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。今次の津波は最大水位が河川堤防高を超えている区間があり、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-2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

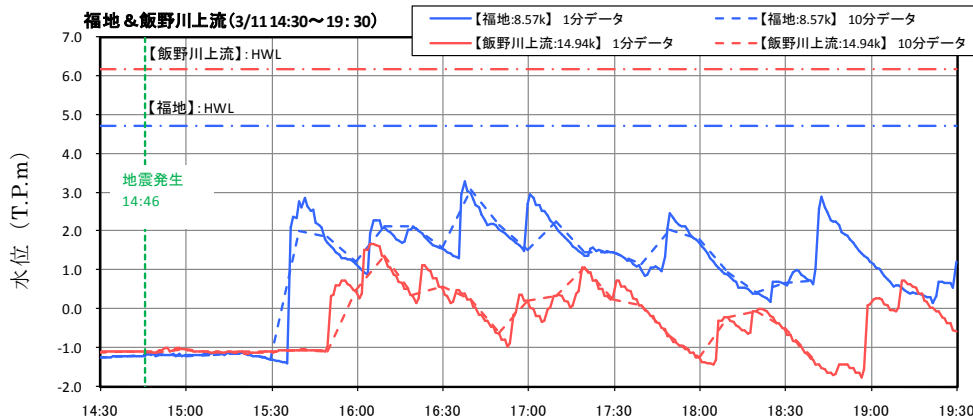
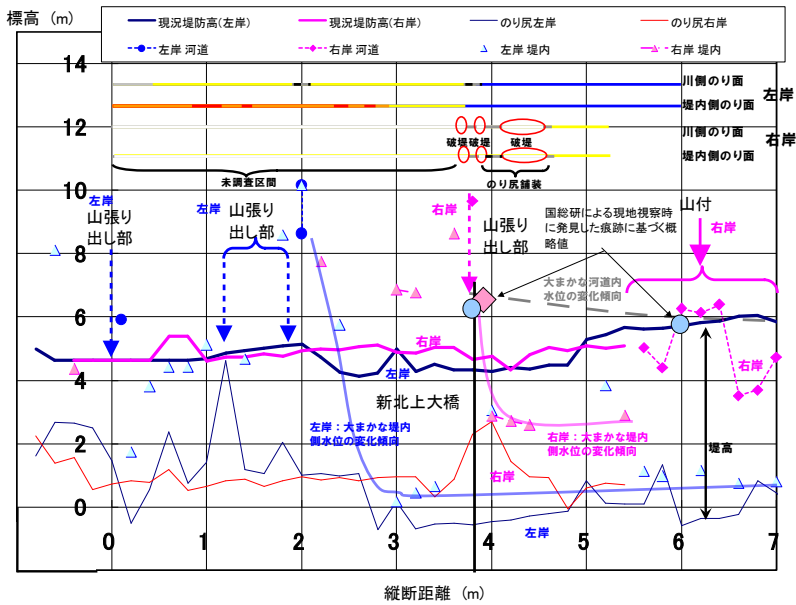
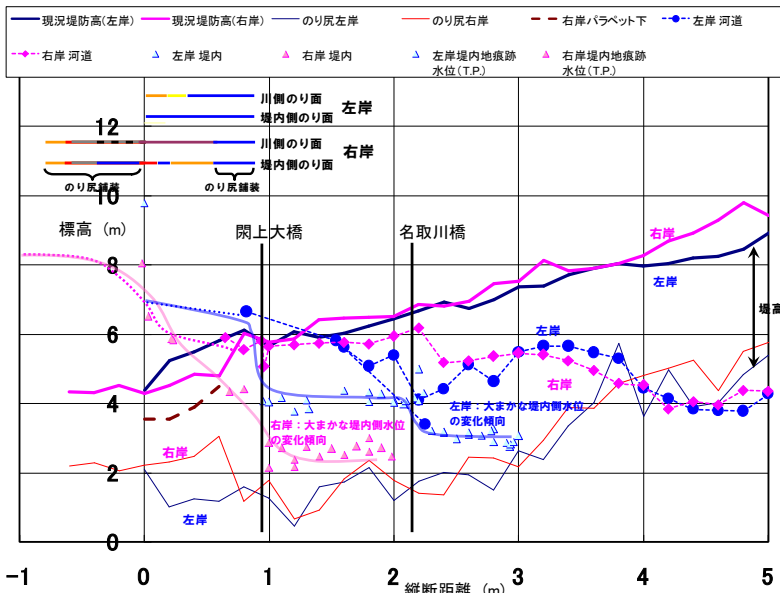


図-1 新北上川における津波遡上時の水位変動観測結果（東北地方整備局よりデータ提供）

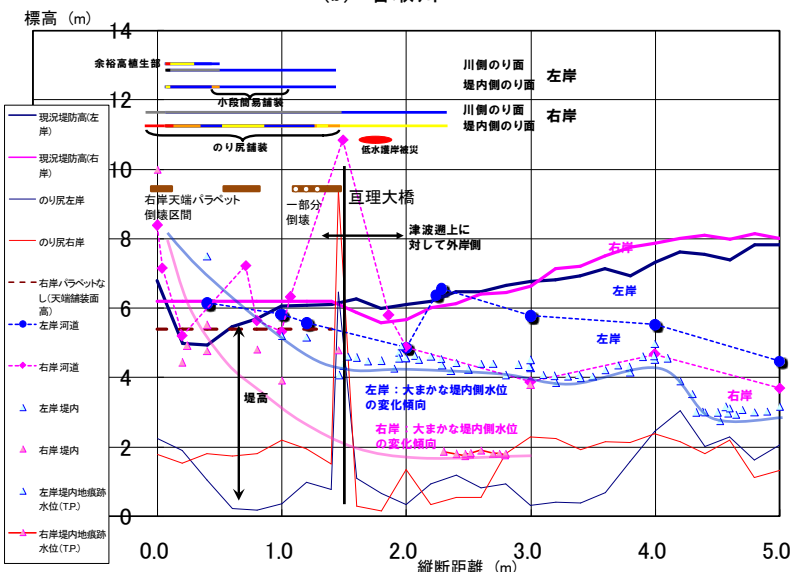
A report on the field survey of the damages to flood control facilities by the tsunami induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake



(a) 新北上川



(b) 名取川



(c) 阿武隈川

図-2 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)

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図-3に示すように大別することができる。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やそれ以降において、川側（河道内の津波遡上が先行する場合）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。

2.3 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

名取川、新北上川、阿武隈川の下流部の空中写真²⁾に津波遡上の流向（写真上の矢印）と遡上状況区分（図-3参照）を併記したものを写真-1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ている。これら写真と図-2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。

(1) 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。この区間より上流では川側・堤内側とも徐々に痕跡水位が低下するが、その度合いが川側より堤内側のほうが大きいので、川側からの越水

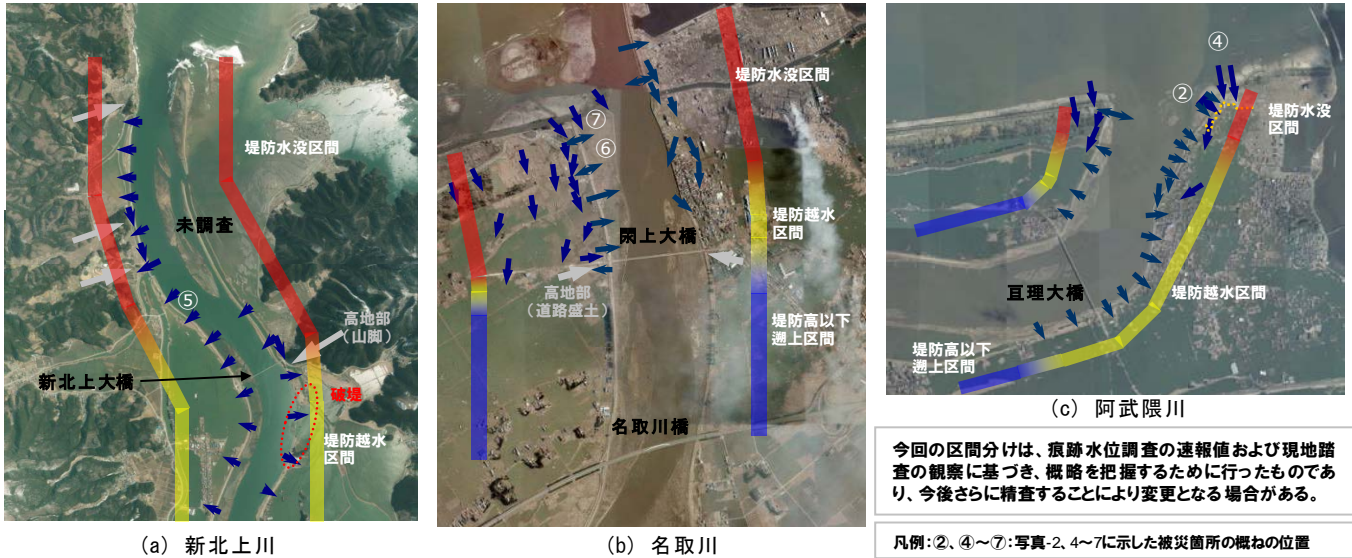


写真-1 各河川の津波遡上状況（空中写真は国土地理院²⁾ から引用）

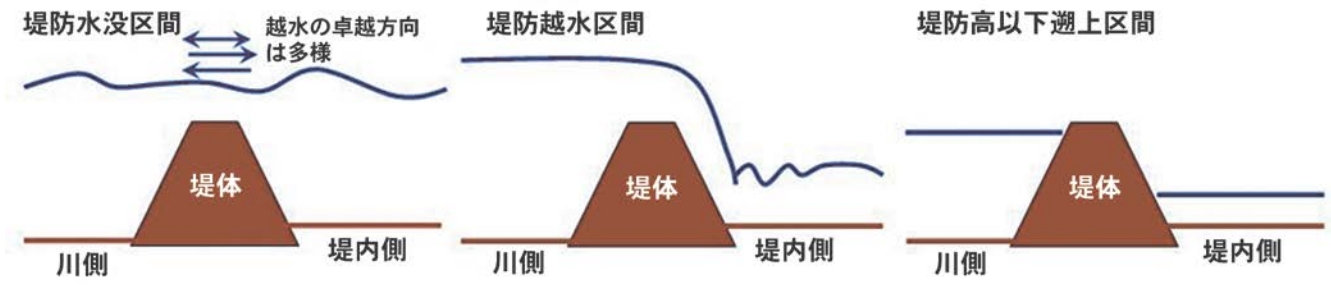


図-3 河川への津波遡上状況の3区分

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。

(2) 盛土・山脚など高地部が(1)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、また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（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-1(a),(b)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、(1)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（左岸側河口から3番目の灰色矢印の地

点）が撮影されている³⁾。

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。

(3) 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、写真-2に示すように川側から越水によるの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³⁾。以上の状況から、こうした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。

(4) 津波遡上に対して外岸側となる湾曲区間

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。阿武隈川の亙理大橋地点では、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。このデータは亙理大橋の高欄に引っ

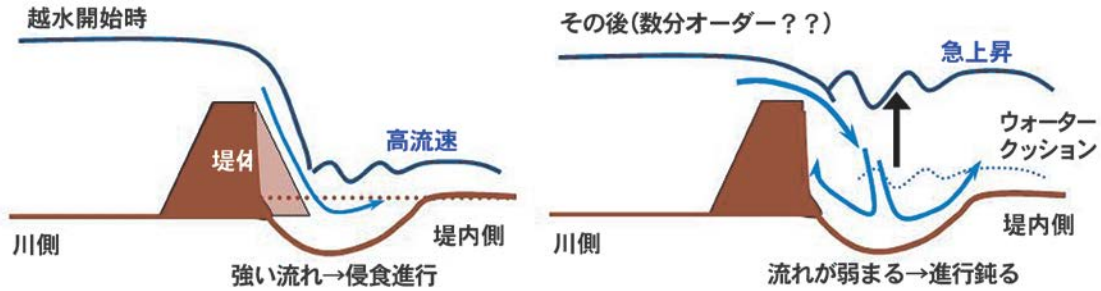


図-4 堤内側の水位急上昇による侵食進行の抑制イメージ

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。後藤・首藤⁴⁾による湾曲部を有する水路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。

3. 河川堤防の被災の特徴

堤防等河川管理施設の被災・変状等について、現地踏査時結果などに基づいて表-1に示すように定性的に分類した結果を図-2に併記した。この整理結果に基づいて、河川堤防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、調査対象河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。なお、個別箇所の被災状況については写真入り速報⁵⁾を参照されたい。

表-1 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侵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

3.1 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(写真-4)、②特殊堤区間(写真-3)、および③河道が湾曲している等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(写真-1(a))に位置していた。

3.2 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、写真-2に一例を示したように堤体断面を大きく減じるものがあることから、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-1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-1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、上記した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、図-4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(写真-5)、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急激に生じたため、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³⁾から確認できる。

また阿武隈川の場合(写真-2)、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



写真-2 越水による侵食・落堀 (阿武隈川)



写真-3 特殊堤の破堤 (鳴瀬川)



写真-4 海岸堤防との接合部での破堤 (阿武隈川)



写真-5 越水による侵食・落堀 (新北上川)

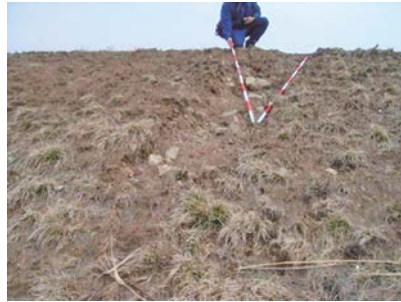


写真-6 川側への越水による損傷 (名取川)



写真-7 遡上流による植生剥離・侵食 (名取川)

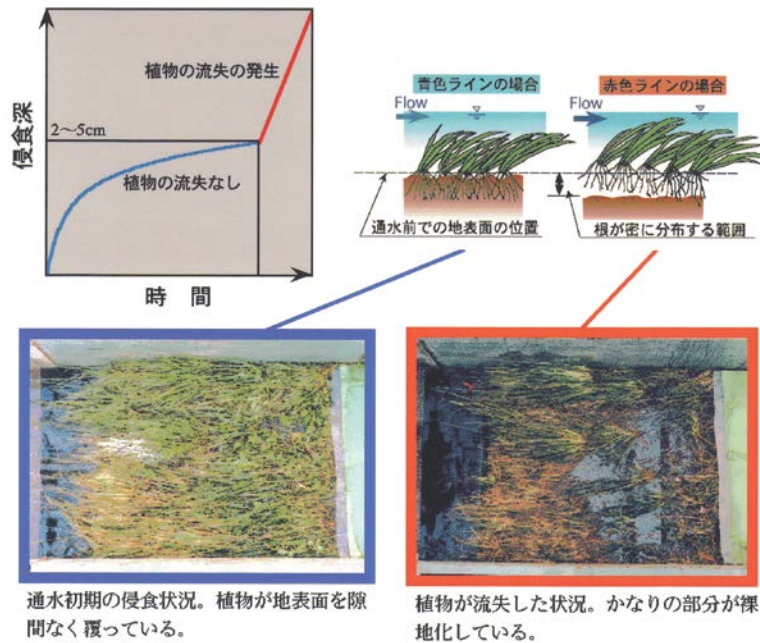


図-5 のり面の侵食進行に伴う植生の剥離⁶⁾

としての効果を発揮するとともに、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。

阿武隈川の場合には、天端まで設置された護岸が天端からさらに川側のり面まで及ぶ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。

なお、堤内側から川側に越水した区間 (名取川 (写真-6)) では、川側のり面に越流に伴う損傷が見られた。ただし、損傷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。この理由としては、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ではある程度水位が上昇しており、これが図-4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。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。

3.3 河道内の津波遡上流れによるのり面侵食

津波が遡上する際の流れの作用による土堤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(名取川(写真-7))。しかし、3.2の越水による侵食に比べると概して侵食の程度は軽微であり、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見られなかった。植生の剥離は、堤防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。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ことにより発揮されると考えられている⁶⁾。そうした低減効果の下でも図-5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い、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い、小さくなることが実験によって確かめられている。

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。写真-7に示した名取川の左岸地点では、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。

4. まとめ

河川周辺における津波遡上時の水位(川側と堤内側)や流れの向きなどの流況、およびそれと関連づけて堤防等の被災の形態や程度に関する検討から得られた主要な結果を以下に示す。

- ①河川周辺の堤内陸域および河道内への津波遡上状況を堤防法線形状と盛土・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破堤に次いで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) NHK：津波の様子(宮城県名取市)
<http://www3.nhk.or.jp/news/jishin0311/>
- 2) 国土地理院：
http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html
- 3) 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/taiheiyokijishinn/kenntoukai/shiryou2_1.htm
- 4) 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。
- 5) 服部敦：河川堤防等被害状況 現地踏査速報(その2)(北上川・鳴瀬川・名取川・阿武隈川の津波による被災)、2011。
<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/110319kasen.pdf>
- 6) 宇多高明ほか：洪水流を受けた時の多自然型河岸防衛工・粘性土・植生の挙動、土木研究所資料、第3489号、1997。

服部 敦*



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室長、博(工)
Dr.Atsushi HATTORI

福島雅紀**



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室 主任研究官、博(工)
Dr.Masaki FUKUSHIMA