自然災害科学 *J. JSNDS 40-2* **-** (*2021*)

2019年台風19号による千曲川の河川堤防の被害と河川管理

土屋　十圀[1]

River embankment damage and management along the Chikuma River due to Typhoon No. 19 in October 2019

Mitsukuni TSUCHIYA[1]

Abstract

Due to Typhoon No. 19 in October 2019, heavy rainfall (300-500 mm) fell in large river basins from the Kanto/Koushin region to the Tohoku region. The heavy rains caused extensive flooding, which resulted in broken embankments and an widespread inundation in the river basins of each region. In addition to the loss of life, extensive damage was caused to residential and industrial areas in eastern Japan.

This study investigated the present condition and damage caused by the floods by examining the current status of embankments and revetments along the Chikuma River. In particular, breakage of the Sakurazutsumi (*sokutai*) embankment needs to be structurally analyzed in the near future. The other side, a survey of sediments and fruit trees showed that the floods caused extensive sediment deposition. The findings showed that too many trees were planted, increasing sedimentation and preventing the drainage of floodwaters. These results are important for river management. This study considered river segment analysis and river management within the context of geology, topography and river engineering. In addition, this report applied hydraulic analysis to river management and estimated factors affecting flood damage using field surveys and government data. The goal of the study was to clarify how flood damage to embankments can be mitigated in the future.

キーワード：河川セグメント，桜づつみ（側帯）堤防，河川管理，河川構造物，水害の要因

Key words: river segment, Sakurazutsumi (*sokutai*) embankment, river management, river structure, factors affecting damage

[1] 中央大学理工学研究所　前橋工科大学名誉教授
Institute of Science and Engineering, Chuo University
Professor Emeritus, Maebashi Institute of Technology

本報告に対する討議は 2022 年 2 月末日まで受け付ける。

1．はじめに

2019年10月12日，台風19号は関東甲信地方から東北地方にかけて大河川の流域に総降雨量300 mm～500 mmの豪雨を降らし，東日本の各地で堤防決壊，越水氾濫が発生し，人命・財産をはじめ農業，商業，交通，観光など，生活や生業，産業活動に至るまで甚大な被害をもたらした。この数年，連続して豪雨災害がつづく中でも突出している被害規模である。全国で決壊した河川とその箇所数は，直轄河川６水系７河川で14箇所，都道府県管理河川20水系67河川で128箇所であった。計20水系71河川で142箇所に及んだ（国土交通省2019年11月20日）。水害の形態は地方都市や中山間部の県管理の河川で堤防決壊と氾濫，浸水，土砂災害である。他方，東京，川崎など大都市は下水排水の内水氾濫という形で被災している。甚大な被害は静岡県から関東甲信，宮城県，岩手県まで13都県の広域に及んだ。

人的被害は死者98人，行方不明３人，家屋被害は全壊2,762棟，半壊17,395棟となり計20,157棟である（消防庁第57報2019年11月21日）。家屋被害は過去のカスリーン台風（1947）を10,859棟，狩野川台風（1958）を3,414棟も上回った。また，床上浸水19,969棟，床下浸水29,727棟で合計49,696棟であった。2018年７月の西日本豪雨災害と比較しても人命（西日本豪雨：死者237人）を除いて，家屋の損壊被害では約3,000棟，浸水被害では約11,700棟，西日本の被災を上回った。

本報ではこのうち千曲川を対象に治水施設や河川構造物の損壊状況について調査結果を報告する。主な調査箇所でこれらがどのように損壊し，被災をもたらしたのか地形，地質の視点である河川のセグメント区分および河川形態に関して述べている。また，河川管理の視点から現地調査と関連資料から水害の要因を水理学的にも考察し，今後の課題を明らかにすることを目標とした。

2．豪雨災害をもたらした台風19号

2019年10月６日に南鳥島近海で発生した台風19号は，大型で猛烈な台風に発達し，９日９時中心気圧915hPaで進路を北に変え，そのまま北上し，12日19時前に945hPaとなり大型で強い勢力で伊豆半島に上陸した。その後，関東地方を通過し，13日12時に日本の東で温帯低気圧に変わっている（気象庁2019）（**図１**）。気象庁は13都県に大雨特別警報を発令した。10月10日から13日までの解析雨量分布は，広い範囲で300 mmを超えて，関東西部，伊豆半島で，総雨量が500 mmを超える地域があった。千曲川流域では上流の関東山地を中心に500 mmを超えている。千曲川流域は最も激しい豪雨を上流域にもたらし，12日の24時間最大雨量は，埼玉県境の十石峠に近い南佐久郡佐久穂町大日向の上石堂で553 mm，荒船山に近い佐久市内山の初谷546 mm，気象庁の観測点である同郡北相木村は395.5 mm，いずれも観測史上最も多かった（信濃毎日新聞：特集ニュース2019.11.1）。一方，飯山市，長野市，千曲市などの下流域では200 mm以下で中上流域に比べ少ない。

その他の地域では，４日間に神奈川県箱根で1,001.5 mmに達し，東日本を中心に17地点で500 mmを超えている（気象庁2019）（**図２**）。また，静岡県から関東甲信越地方，東北地方の多くの地点で３，６，12，24時間降水量の観測史上１位の値を更新し，箱根町922.5 mm/日は，気象庁観測で最大となり記録的な大雨となっている。

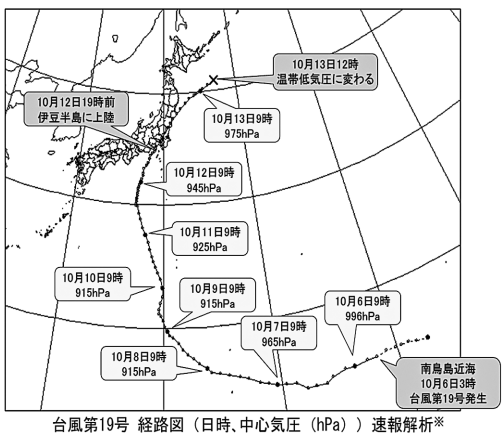


図１　2019年10月台風19号の経路（気象庁，2019年10月15日）

3．千曲川の河川形態とセグメント区分

千曲川は長野県内の河川名であるが，信濃川水系全体では上流部に位置する。しかしながら，河床勾配，砂礫など河川の地形・地質・生態系の要素からみると３つの区分に分けられる（沖野外輝夫2003）。最上流から佐久盆地まではセグメント区分は Aa（侵食），中流の上田盆地や千曲市杭瀬下まではセグメント区分 Bb（運搬），下流の長野・飯山盆地ではセグメント区分 Bc（堆積）を示す形態となり信濃川水系の上流部だけですべの区分を有している（図３）。この区分は山本のセグメントの定義（山本2004）に順じれば Aa はセグメン

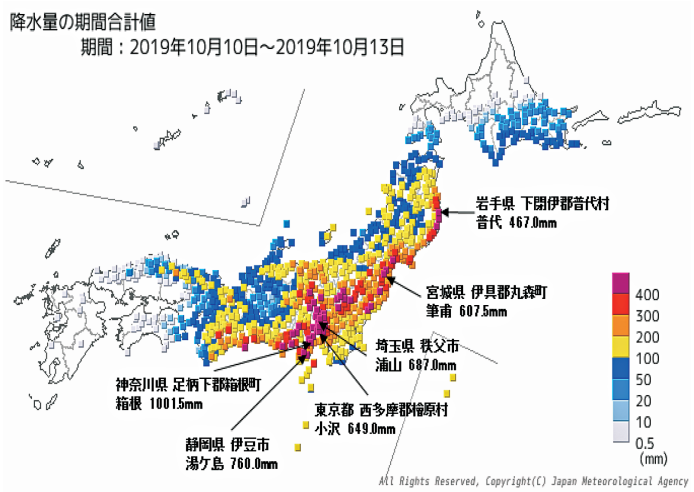


図２　台風19号による降水量10月10日から13日までの総雨量（気象庁2019年10月15日）

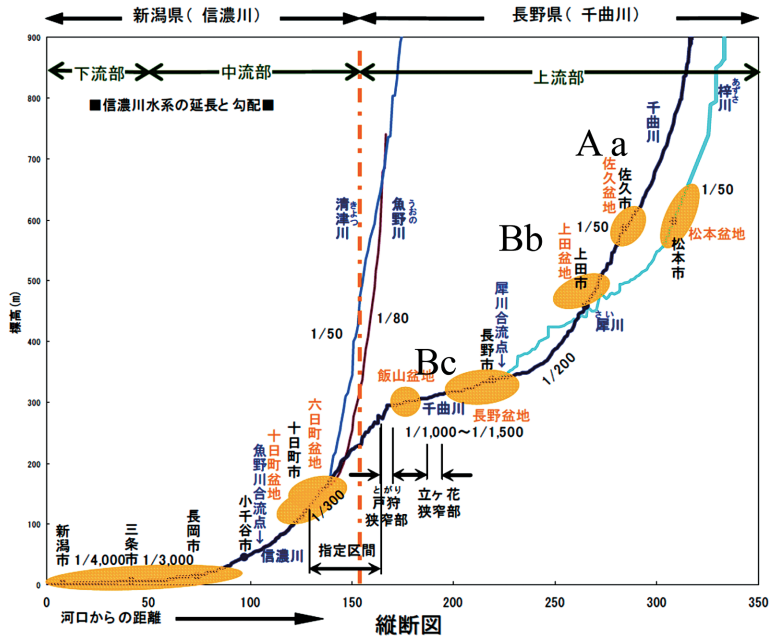


図３　信濃川・千曲川の縦断図（国土交通省北陸地方整備局資料に加筆）

表 1　沖積河道区間についての代表的なセグメント類型とその特徴，山本晃一：（財）河川環境管理財団，沖積河川－構造と形態－技報堂出版，2010

	セグメント M	セグメント 1	セグメント 2		セグメント 3
			2-1	2-2	
地形区分	←山　間　地→	←扇　状　地→	← 谷　底　平　野 →		
			← 自　然　堤　防　帯 →		
			← デルタ →		
河床材料の代表粒径 ds	多種多様	2 cm 以上	3 cm ～ 1 cm	1 cm ～0.3 mm	0.3 mm 以下
河岸の構成材料	河床河岸に岩が出ていることが多い	表層に砂，シルトが乗ることがあるが，薄く，河床材料と同一物質が占める	細砂，シルト，粘土の混合材料。ただし下部では河床材料と同一		シルト，粘土
勾配の目安	多種多様	1/60～1/400	1/400～1/5,000		1/5,000～水平
蛇行程度	多種多様	曲がりが少ない	蛇行が激しいが，川幅水深比が大きいところでは 8 字蛇行又は島の発生		蛇行が大きいものもあるが，小さいものもある
河岸浸食程度	非常に激しい	非常に激しい	中（河床材料が大きいほうが，水路がよく動く）		弱（ほとんどの水路の位置は動かない）
低水路の平均深さ	多種多様	0.5～ 3 m	2 ～ 8 m		3 ～ 8 m

ト M，Bb はセグメント 1，Bc はセグメント 2 に，ほぼ対応する。その定義は地形区分を山間部，扇状地，谷底平野，自然堤防帯およびデルタの 5 つに区分し，これに対応する河岸の河床材料の砂礫の代表粒径，河岸の砂やシルトなどの構成材料，河床勾配，蛇行の程度，河岸の浸食程度および低水路の平均深さの 6 つの指標をもとに全国の河川調査データから構造と形態を一般化している（**表 1**）。

また，千曲川は日本列島の地形・地質学的にも長野圏域から佐久圏域において河道がフォッサマグナである地溝帯に位置している（**図 4**）。信濃川河川延長367 km のうち千曲川214 km（58%）であり，信濃川流域面積12,050 km^{2}のうち千曲川流域面積は支流犀川を含めて7,163 km^2（59%）である。

このように信濃川・千曲川は日本列島の屋根といわれる山岳地帯を流れ，越後平野から日本海に達する国内河川の中でもすべての河川形態（セグメント区分）を二重に有する典型的な最長大河である。

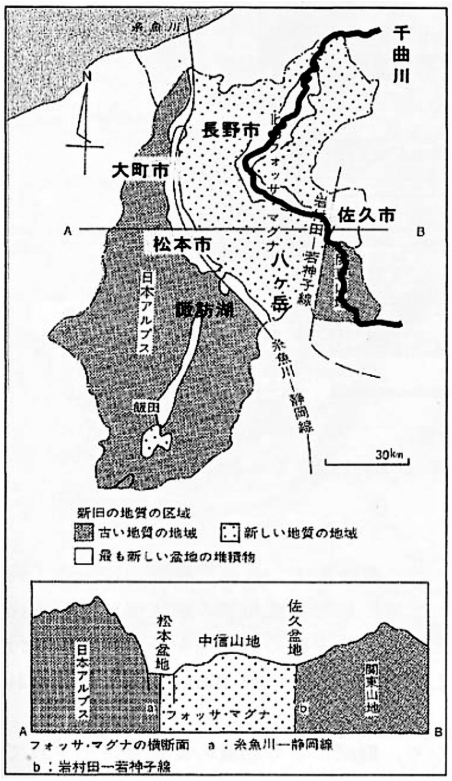


図 4　長野県における北部フォッサマグナの範囲（国土交通省北陸地方整備局千曲川河川工事事務所：信濃川の青龍犀川，1994.）

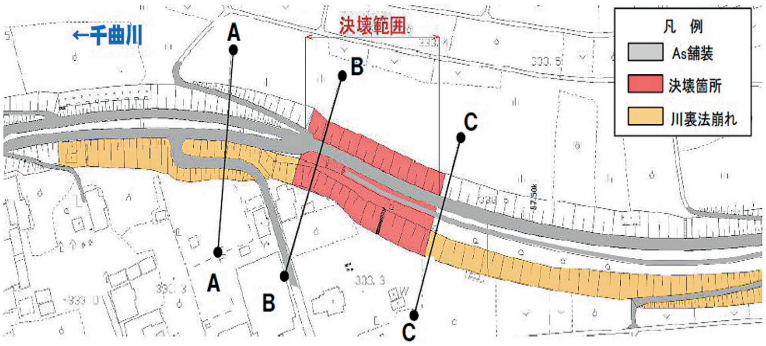


図５　穂保地区堤防決壊箇所平面図（国土交通省）

４．河川構造物の損壊

4. 1　長野市穂保地先の堤防決壊

この決壊箇所は直轄管理区間であり，決壊した堤防（桜づつみ）は，従来の堤防に14 m 拡幅する築堤工事を12年間を要して行い，2016年に完成している。しかし，決壊箇所より5.5 km 下流の立ヶ花観測所の流域平均降雨量は196.8 mm/２日を記録し，これは100年に１度の計画降雨量を10.8 mm/２日上回り，計画高水位（T.P.334.95 m）は1.77 m も超過した。その結果，立ヶ花より上流の左右の堤防で数か所越水し，穂保地先の左岸堤防が約70 m にわたり決壊した（**図５**）。氾濫した浸水面積は約950ha である。氾濫した長沼・豊野地区等の被害は死者２名，床上浸水3,305棟，床下浸水1,781棟であった（信濃毎日新聞2019年10月18日刊）。周辺の堤内外地はリンゴ果樹栽培等が盛んな地域であり農業被害も甚大となった。当該箇所は千曲川の支川犀川の合流後（**図３**），下流の立ヶ花の狭窄部（川幅約230 m）まで約12 km 区間は川幅約1,000 m，河床勾配1/1,100と緩勾配である。この決壊箇所を含む河道は千曲川下流のセグメント２（2-2），（Bc）の区分にあり，細砂やシルトが堆積しやすい地形環境にある。かつての旧河道は蛇行し，湛水しやすく湿地帯でもあり，洪水の被害が大きい地域であった。このため大正９年に内務省堤防が建設されている。

(1) 桜づつみ堤防（側帯）の構造から堤防決壊の要因を探る

国土交通省の第３回千曲川堤防調査委員会（2019年12月10日）の結論は決壊要因の可能性として越水の影響程度を評価し，次の４点について見解を示した。①「監視カメラから越流が生じているのが確認されており，堤防決壊地点の上下流区間も川裏法尻に越流水による洗掘等が確認されている。これらのことから，越流によって堤防等の欠損が発生し決壊の主要因になったと推定される」としている。また，②堤防の浸透による滑り破壊については「越流時の洗掘により堤防等が痩せていく過程ですべり破壊が生じた可能性は排除できないが主要因ではないと言える」としている。③浸透によるパイピング破壊に関しては「基礎地盤は厚い粘性土層の分布が確認されており，パイピングが起きにくい地質構成になっている。」として「パイピングが主要因となった可能性は低いと推定される」とした。④侵食に関しては「堤防決壊箇所の上下流とも川表法面に目立った侵食の痕跡は確認できないことから，決壊の主要因となった可能性は低いと推定される。」とした。なお，越流は監視カメラと水位記録から10月13日０：30頃に堤防天端 T.P.338.2 m に達し，その後，同月13日２：40に最高水位 T.P.339.0 m に達している。堤防からの最大越流水深は0.8 m であった。その間に２時間以上堤防からも越流が発生していた。ここで，委員会の見解のうち①，②の「堤防決壊の主要因」論に関して，堤防（桜づつみ）に踏み

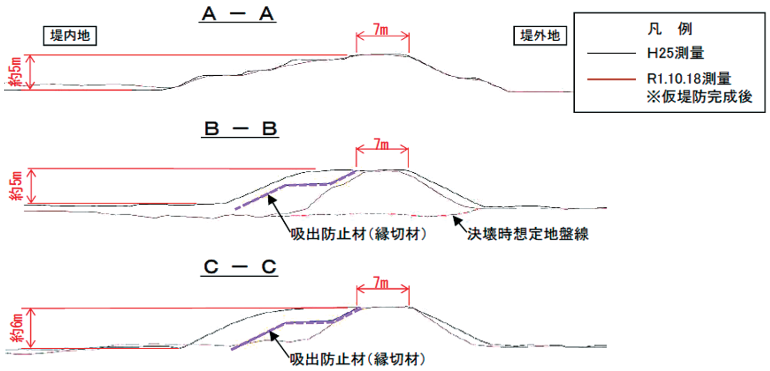


図 6　穂保地区決壊箇所堤防断面図（国土交通省）

込んだ見解が示されていないため，筆者は堤防（桜づつみ）の地質構造の特殊性から「越流による堤防等の欠損の可能性」及び「浸透による滑り破壊」は洗堀の進行過程で連続して発生したことが決壊の要因であったことを論じるものである。

(2) 決壊した「桜づつみ」堤防とは何か

図 5 は穂保地区堤防決壊箇所の平面図，図 6 は決壊箇所を含む堤防の 3 箇所の断面図である。「桜づつみ（側帯）堤防」は図 7 に示したように斜線部の盛土のことで，堤防の側面に吸出し防止材（縁切り材）で仕切り，その上部に土砂で盛土し，堤防天端ですり合わせて裏のり面に厚さ30 cm の衣土を置き，桜を植栽してわら芝で覆い築堤されている。衣土とは芝植生が降雨による侵食の発生を防止する目的で粘性土を標準として使用している。これは工作物設置許可基準（国土交通省平成 6 年 9 月22日），及び河川管理施設等構造令（国土交通省平成25年 7 月 5 日改正），第24条の二項，第二種側帯に該当する構造になっている（国土交通省北陸地方整備局）。吸出し防止材（縁切り材）は不織布のポリエステル製品で引張荷重が 1 トン/m 以上である。

上記の省令等によると，この桜づつみ（側帯）の機能は堤防の安定を図るため非常用の土砂等をここに備蓄し，若しくは環境を保全するため，堤防の裏側の脚部に側帯を必要な箇所に設けた堤防と位置付けたものである。したがって，側帯である裏のり側は本体堤防ではないため植樹を可能として実施している。河川法では堤防は樹木を植えることはできない。決壊箇所の近傍には堤防裏のり尻に非常用土嚢などを準備する施設がある。現地の調査でもわかったことは桜を植栽した桜づつみ堤防（側帯）で縦断的にほぼ垂直に崩落している。図 8 は決壊から 3 日後の10月16日，国交省が撮影した決壊箇所の垂直写真である。また，①～④の角度から撮影した堤防の各構造を次の図 9，図10, 図11に示した。図 9 ①は決壊部上流側の（側帯）崩落地点，図10②は桜づつみ（側帯）盛土の崩落した縦断面である。図 6（C–C 断面）の構造図からも，この個所は残存した吸出し防止シートを境に縦断方向に垂直に崩落していることが明確に分かる。

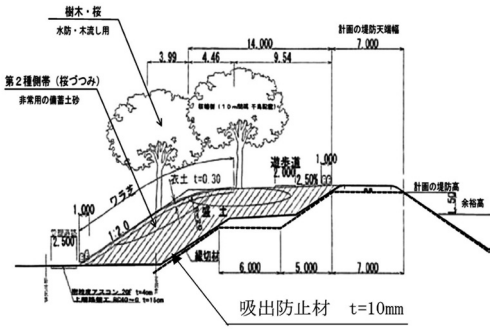


図 7　長野桜づつみ工事標準断面図（国土交通省北陸地方整備局）

図 7　長野桜づつみ工事標準断面図（国土交通省北陸地方整備局）

この側帯は堤防天端とほぼ面一（つらいち）に施工されて雨水等を浸透，排水させることが目的であり，裏法

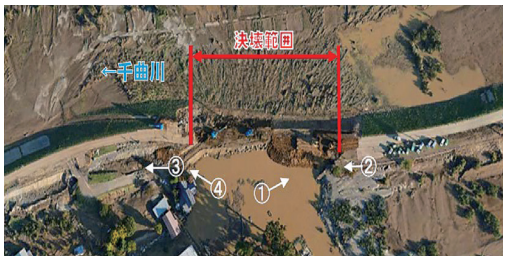


図 8　決壊箇所の垂直写真①～④別途撮影箇所（2019.10.16撮影：国土交通省）



図 9　桜づつみ堤防（側帯）崩落地点，吸出し防止シートを境に裏のり面の崩落がみられる　①決壊部上流側　2019.10.13撮影（国土交通省資料）

脚部には水抜きドレーンを付けた構造である。吸出し防止シートは本来，本体堤防への水の浸潤による土砂の吸出し防止を目的にしたものである。しかし，この吸出し防止シートは上面，側面に覆土されている桜づつみの土砂と堤体を分離する素材となり，ここに浸透した雨水，あるいは越流し浸透した水が直接排水され滑りやすい境界面を作ってしまった可能性が推察される。図11③は図 6（B–B ～ A–A 断面）の決壊箇所の下流部であり，桜づつみ堤防（坂路）のり面も同時に崩落している。堤防天端は兼用道路であり舗装され市道でもある（図 5）。赤色が決壊箇所で，黄色は「川裏法崩」である。ここは「桜づつみ（側帯）堤防」でもあり決壊箇所も同じ構造である。また，河川にアクセスする道路が決壊箇所周辺の堤外地，堤内地に計 6 本ある。これを河川管理では「坂路」という名称で工作物設置許可基準（国土交通省平成 6 年 9 月22日），河川管理施設等構造令（国土交通



図10　桜つづみ盛土（側帯）崩落地点，②決壊地点上流側　2019.10.21撮影（国土交通省資料）



図11　③桜つづみ堤防（坂路）のり面崩落地点，および堤防決壊地点の下流側である図 5，図 6（B–B 断面）。2019.10.13撮影（国土交通省資料）

省平成25年 7 月 5 日改正）などでは坂路の設置が不適当な箇所として堤外地の水衝部（川表部）となってる。また，坂路は計画堤防内に設置しないことを基本とするとしている。更に，決壊箇所の図 6（B–B 断面）は交通量も多く堤防の不同沈下も懸念されている。これらの課題の検証が必要となる。

次に，図12の国の堆積物調査では図中①，②，③に示すように決壊箇所上端付近では側帯から堤内地側への大量の砂利の堆積があり，厚さは1.5 m ～最大3.0 m と報告している。これは桜づつみの側帯に備蓄されていた砂利が崩落したものと考えられる。筆者らの調査でも決壊箇所より下流の左岸55.5k 付近においても越流により側帯の法面

が崩落し，砂利がむき出しになっていることが確認できた（図13）。桜づつみ堤防の決壊箇所を含む約1.5 kmにわたって越水していたことが分かっている。

国土交通省が2020年２月に住民説明会資料として決壊上流側の堤防開削調査の断面（図14）を公表している（国土交通省2020年２月27日）。この写真の堤防右端の土砂は仮堤防撤去の土砂と明記されている。それ以外は図７の桜づつみ堤防に示した標準断面及び図６（C-C 断面）横断図と同様である。側帯部の衣土をはじめ土砂（Bs-1砂質土）は点線ライン以上に盛土されていたが，崩落していることが図６（C-C 断面）と比較してわかる。図14は粘性土（Bc）によって礫質土（Bg），砂質土（Bs）の全体を覆土しており，上層からの浸透や漏水の可能性も少ない，かつ堤防の基盤は厚さ約10メートルの粘土層となっている。

以上の資料による検討から堤防の決壊要因は越流時の洗掘により裏法面の侵食が次第に拡大し，吸出し防止シートを境に側帯の滑り破壊につながり，更に洗堀の進行過程で連続して本体堤防の損壊に至ったことが決壊の要因と考えられる。桜づつみ堤防の側帯の機能は「環境向上」のほか「非常用の土砂」であり、水害時に土嚢に使用する目的があった。非常時の本番で発揮できなかったこ



図12　桜つづみ堤防（側帯）のり面崩落地点，堆積物調査①堆積砂利最大3.0 m，②堆積1.5m，③堆積2.0 m　2019.10.18撮影（2020.2.2国土交通省住民説明会資料）



図13　左岸55.5k+133～213 m 越水により堤防（側帯）裏のり侵食箇所から崩落した砂利（筆者撮影）

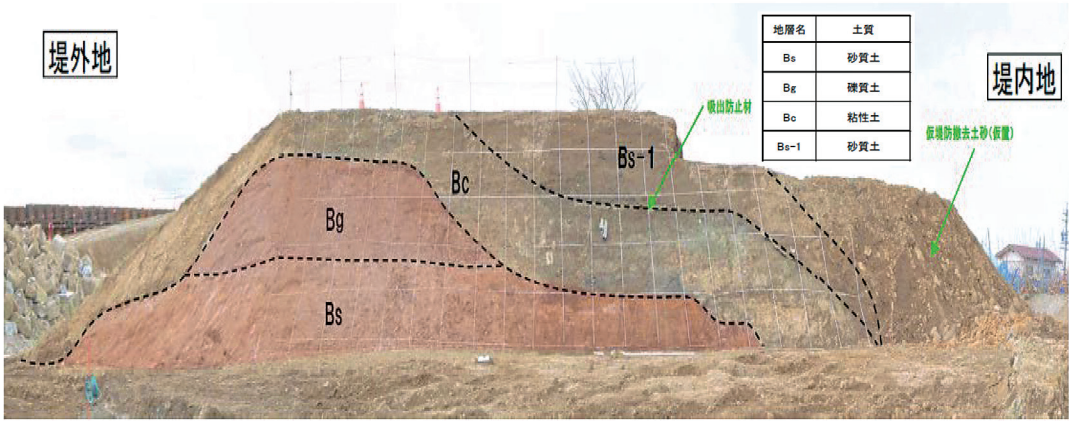


図14　上流側の堤防開削調査，2020.2.2住民説明会資料（国土交通省北陸地方整備局千曲川河川工事事務所）

とは検証課題である。この堤防は「桜づつみ」と呼ばれ，長沼地区の過去の水害との戦いの歴史を伝承し，記憶するために地元の小学生の歌詞をここに立て桜を植栽し，百年堤防として地元の声を反映して2016年に完成している（毎日新聞2019年10月18日朝刊）。また，毎日新聞（2019年10月15日夕刊，国土交通省（2020年２月27日）の情報等から筆者の印象を加えると，市民の感覚では本来の堤防としてしか見えず，広げられた堤防構造の側帯の詳細を理解していなかったものと推察することができる。桜づつみ堤防の越水により市民の想いや設置者の意図とは相反する堤防決壊という悲劇を生んでしまったと考えられる。今後，桜づつみ堤防の構造的検討を実験等で検証する必要がある。

５．決壊箇所周辺の高水敷利用と堆積土砂量・果樹木の密度

千曲川下流の河道は地形・地質的に河川形態のセグメント区分では２又はBc区間であり長野盆地を流れている。河川勾配は1/1,000～1/1,500で緩勾配である。下流部には立ケ花狭窄部があり，地形的にも滞留しやすい河道構造となっている。したがって，国土交通省千曲川河川事務所の1995（平成７）年～2005（平成17）年の河床変動調査でも狭窄部上流は若干堆積傾向にあることが把握されている（国土交通省2019）。このため河床掘削による河床低下を図ることが指摘されている。

今回の台風19号がもたらした洪水による流出土砂量は膨大な堆積量が推測される。また，河川幅約1,000 mになる河川敷には地割慣行制度と呼ばれ共有地として果樹栽培などが伝統的に行われている（内藤武美2004）。更に，河畔周辺には自然林が繁茂している。これらの果樹を含む樹林は高水敷に面的にも広範囲に存在している。これは河道の疎通能力に対して流れを阻害する要因になることは明らかである。このため河道の高水敷内の樹林・果樹木・土砂堆積量を把握し，今後の河川維持管理にかかわる資料とすることを目標に調査を実施した。

5. 1　堆積土砂および果樹木・河畔林調査

(1) 調査日時と区間・箇所

第１回，2019（令和元）年11月７日，小布施橋下54.5k～村山橋60.0kの区間５箇所，第２回，2020年１月17日小布施橋下流52.5k～屋島橋62.0kの区間５箇所

(2) 調査方法と目的

調査箇所は**図15**に示した黄色の□印の箇所である。河川敷は右岸側５箇所，左岸側５箇所の計10ケ所で実施した。河川敷の利用形態はリンゴ果樹園４ケ所，栗果樹園２ケ所，桃果樹園１ケ所，裸地２ケ所，サッカー場１ケ所となっている。果樹木調査は樹高，目通し高の樹幹直径の測定を実施し，メジャー，距離計，スタッフを使用した。果樹木調査では樹木密度の評価を行うことを目的とした。なお，一般樹木は河畔を中心に広範囲に存在していため重点的に調査を実施した。

(3) 調査結果

１）河川敷土砂堆積調査

調査結果の一覧を**表２**に示した。土砂堆積深の調査では平均堆積深の最大値は左岸55.5k付近のリンゴ果樹園38.05 cm（計測箇所数20ケ所），最小値は右岸57.0k付近の北相之島のリンゴ果樹園で11 cm（計測箇所数４ケ所）となっている。全体的に地質は上層がシルト，下層が粘土で構成されている。全調査地点の10ケ所の平均値23.18 cm，左岸側の平均値31.53 cm，右岸側の平均値は13.16 cmである。

これらの計測・目視から推定すると堆積深の上層がシルト，下層が粘土または下層細砂となっている箇所もある。上流および左岸ほど上層シルト・下層細砂が多くなっている。これは洪水により砂など比重の大きなものが最初に掃流力で運ばれて沈殿し，その後，水位が上昇し滞留が始まる。更に，流速が減衰する箇所から徐々に浮遊しているシルトが沈降していた現象と考えられる。また，河川敷の左岸は右岸の２倍以上堆積しやすいことも分かった。小布施橋上流55.5k付近から57.0k付近の左岸ではシルトの堆積が顕著であった。右

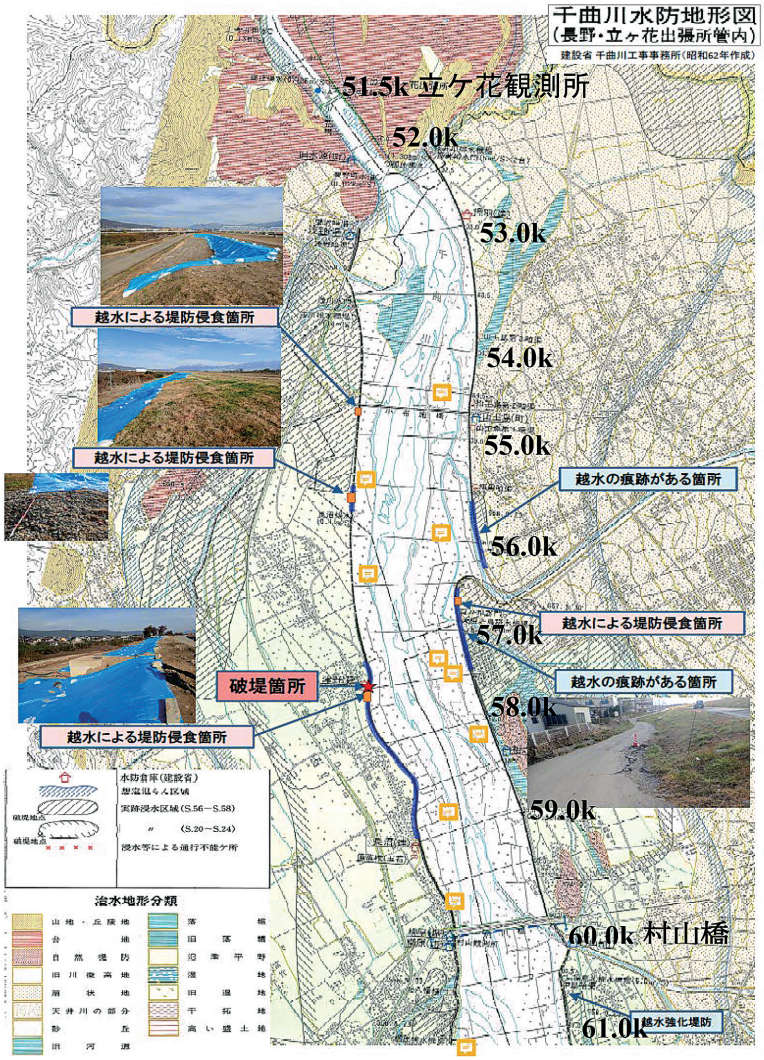


図15　河川敷土砂堆積・樹木及び越水箇所調査黄色□印：土砂堆積調査箇所，千曲川水防地形図に加筆

岸56.0k 付近の栗樹木では支流松川の流入の影響でシルト・細砂で堆積深は13.5 cm と比較的少ない。左岸59k 付近の河川敷のリンゴ果樹園の 4 m ポール先端まで葉面に洪水トレーサーとしてシルトが付着している（図16）。

2）河川敷樹木・果樹木調査

調査結果の一覧を表 3 に示した。一般の樹木調査では左岸58.2k 村山橋下流の河川敷にはケヤキの樹高35.05m，直径φ5.3 m，樹高約25 m の巨木がある。神社鳥居があり浸水高2.8 m，直径φ34.06 cm の柱があり象徴的な場所として高水敷にある。また，樹高約10～20m の河畔林が右岸左岸とも繁茂しており，高水敷の河畔に縦断方向に繁茂している状況は写真でも明らかである（図17）。

また，伐採され堤防に約100 m にわたり積み上げられた樹木からも巨木（直径20～40 cm）であることが分かる（図18）。

表２　河川敷土砂堆積調査結果

NO	測定地点	河川敷		利用形態	平均堆積深 (cm)	計測箇所数	土質 (上層・下層)	周辺環境
1	62.0k 屋島橋下流付近 (1.17)	左岸		サッカー場	21.78	8	シルト・細砂	川沿い樹林
2	58.2k 村山橋下流岸寄り (1.17)	左岸		裸地１区画	34.06	8	シルト・細砂	巨木
3	59.0k 下流 (11.7)	左岸		リンゴ果樹園	26.3 cm, 32 cm	5	細砂・リップル	低水路32 cm
4	56.5k 低水路側 (11.7)	左岸		栗樹木	37	2	シルト・細砂	
5	55.5付近 (1.17)	左岸		リンゴ果樹園	38.05	20	シルト・粘土	
6	54.5付近小布施橋下 (1.17)		右岸	裸地	13.17	6	シルト・粘土	
7	56.0k 付近 (1.17)		右岸	栗樹木	13.5	6	シルト・細砂	松川流入
8	57.0k 付近上 (11.7) 北相之島		右岸	リンゴ果樹園	11	2	シルト・粘土	
9	57.0k 付近横 (11.7) 北相之島		右岸	リンゴ果樹園	11	2	シルト・粘土	
10	58.5k 付近 (1.17) 相之島		右岸	桃果樹園	17.14	7	シルト・微細砂	

平均堆積深23.18cm, 左岸31.53cm, 右岸13.16cm

表３　河川敷果樹園・樹木調査結果

NO	測定地点	河川敷		利用形態	樹木本数	面積 (m2)	樹木密度 (本/m2)	平均樹高 (m)	平均直径 (cm)
1	62.0k 屋島橋下流付近 (1.17)	左岸		サッカー場	生垣	約1,500			
2	58.2k 村山橋下流岸寄り (1.17)	左岸		裸地１区画	(ケヤキ樹高35.05 mφ 5.3 m, 樹高約25 m, 神社鳥居浸水高2.8 mφ 34.06 cm)				
3	59.0k 下流 (11.7)	左岸		リンゴ果樹園	16	440	0.036	2.52 m	15.1
4	56.5k 低水路側 (11.7)	左岸		栗樹木	17	1,488	0.011	6－7 m	41.8
5	55.5付近 (1.17)	左岸		リンゴ果樹園	53	4,250	0.0125	2.5 m	17
6	54.5付近小布施橋下 (1.17)		右岸	裸地	なし	400	なし	なし	なし
7	56.0k 付近 (1.17)		右岸	栗樹木	14	400	0.035	6－7 m	約40
8	57.0k 付近上 (11.7) 北相之島		右岸	リンゴ果樹園	10	312	0.032	2.23 m	16.2
9	57.0k 付近横 (11.7) 北相之島		右岸	リンゴ果樹園	14	448	0.031	2.23 m	18.3
10	58.5k 付近 (1.17) 相之島		右岸	桃果樹園	21	625	0.034	約３m	約16–18



図16　左岸59k 付近の河川敷のリンゴ果樹．ポール先端の葉面にシルト (筆者撮影)



図17　右岸57k 付近の河川敷に繁茂する樹林帯，その背後が低水路 (筆者撮影)

一方，果樹木調査の種別ごとの結果は次の通りである。高水敷のリンゴ果樹の樹高は2.23 m ～ 2.52 m，栗樹木の樹高約 6 m ～ 7 m，桃は約 3 m となっている。果樹の幹直径は夫々リンゴ果樹15.1～18.3 cm，栗樹木40～42 cm，桃16～18cm である。

樹木密度はそれぞれリンゴ果樹0.0125～0.036本 /m^2，栗樹木0.011～0.035本 /m^2，桃0.034本 /m^2 となっている。

これらの果樹木の水没状況を電子国土の河川横断図から読み取り推定した。越水した堤防天端高から高水敷高との差を水没深さとした。その結果，水没深さは決壊地点の左岸57.5k 付近は4.65～5.51 m，左岸59.0k は3.11～3.28 m，下流の左岸55.5k は5.31～5.50 m である。右岸57.0k は4.68～5.18 m，右岸58.5k は4.36～5.73 m，下流の右岸54.5k は5.41～5.70 m である。

栗樹木を除いて左岸59.0k・左岸55.5k・右岸57.0k のリンゴはすべて水没している。

次に，**表 3** の河川敷果樹木・河畔樹木調査結果から，河道の高水敷における植樹の基準で果樹木の密度の評価を行った。河川における樹木管理の手引き（財団法人リバーフロント整備センター1999）で示されている植樹の条件と許容植樹密度（上限）によると河床勾配1/2500以下の場合，高水敷の水深（0.5 m ～6.0 m）と低水路幅 / 高水敷幅比（0.2～6.0）の関係について 1 ha 当たりの樹木本数が示されている。



図18 伐採し堤防に積み上げられた河川敷樹木（左岸55k 付近2020.1.17）（筆者撮影）

調査箇所のリンゴ果樹の平均密度0.024本 /m^2，栗樹木の平均密度0.023本 /m^{2}は 1 ha 当たりにすると其々240本 /ha，230本 /ha となる。この個所の高水敷の水深は 3 m ～ 5 m，低水路幅 / 高水敷幅は0.32であるから基準によると高水敷の水深4 m の場合許容植樹密度は0.5本 /ha となっている。リンゴ果樹密度は許容植樹密度の480倍，栗樹木は460倍になる。現在の果樹木は超過密した高水敷になっている。今後，果樹木は群落となっている点を考慮し，粗度係数の評価を行っていく必要がある。

3）土砂堆積に関する考察

図19は左岸59.0k のリンゴ果樹園の土砂堆積状態を示している。**図20**はリンゴ果樹園の河川敷に形成された Sand ripple である。右側の上流から左側下流に土砂堆積が畝の山波を形成していることが分かる。リンゴ樹木の間を川の縦断方向に堆積している。正面奥が低水路河道となっている。堆積した形状は山型となり峯の高さは45 cm，峯と峯の間は 4 m 間隔で，谷では堆積深さ10 cm と小さい。堆積したのは主に細砂が多量であり，シルトは僅かに地表面とリンゴの葉面，果実表面に分布している。ここで見られた水理現象は砂漣，砂堆が発生していたことを示している。

洪水時，高水敷を流れる流体の挙動を推測することができる。砂漣は砂粒子が静止状態から流速



図19 リンゴ果樹園の土砂堆積深計測（筆者撮影）

が増加する過程で河床の乱れによって最初に現れる現象である。周辺のリンゴ樹木は流体力による倒伏や変形は認められず，かつ周辺畑地は洗堀や深掘れが発生していない。また，リンゴ果樹園内の流れは反砂堆ができる射流（Fr＞1：フルード数1以上）とは考えにくい。したがって，流向は低水路から河道の横断方向に流れ込み，初めは流速が小さく，細砂が沈降し，さらに増水によって乱された後，やがて水中に滞留していた浮遊性のシルトが時間をかけてリンゴの葉面，果実表面にも沈着したことが推察できる。

4）土砂堆積状況

小布施橋上流の左岸55.5k付近のリンゴ果樹園は堤防から河川敷に坂路を使って入ることができる。そこは堤防から見ていた光景とは全く異なる。リンゴ果樹園内にはアスファルト舗装された通路が張りめぐらされている。河畔林が生い茂る場所まで調査することができた。幅3.5 m程度の通路の両側には堆積した土砂の壁がつづいている（図21）。堆積深は区画されたリンゴ園のまとまった一区画の二辺を5 m間隔で測定するようにした（図22）。

著者らは農作業中の果樹農家の方にヒアリングを行い過去の堆積した地層を教えていただき計測を進めることができた。過去に堆積した地層の境界は雑草などが枯死していることから見分けることができる。また，シルトは透水性が悪いため新しい堆積層は水分を含み黒色になっていることかもわかる。

耕作がされていない裸地も2箇所の調査を行った。また，深さ約2 m以上の試掘箇所では今回の19号による洪水土砂の痕跡を確認することができた．ここの堆積深は約60 cmの深さである。また，過去の堆積土砂は掘削除去されていないことも分かった。リンゴの樹木は幹の枝分かれの腰や肩まで土砂に埋没している（図23）。



図20　リンゴ果樹園の堆積状況
Sand ripple（砂漣，砂堆）4 m間隔で堆積し，深さ10～45 cm（筆者撮影）



図21　リンゴ果樹園の土砂堆積の状況左岸55.5k付近（筆者撮影）

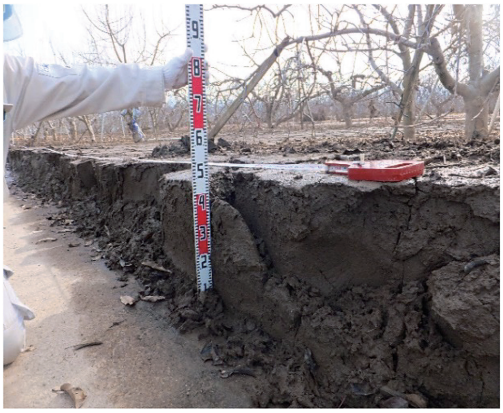


図22　リンゴ果樹園の土砂堆積深の計測　一区画の二辺を5 m間隔で計測，左岸55.5k付近（筆者撮影）



図23 リンゴ果樹園の土砂堆積深さの最大値は60 cm の箇所（筆者撮影）

5）土砂堆積量の推定

土砂堆積の深さは全調査地点の10ケ所の平均値23.18 cm，左岸側 5 ケ所の平均値31.53 cm，右岸側の 5 ケ所の平均値は13.16 cm である。この数字は堤防からの越水がシビアーな議論となる中では，決して無視できる数字ではないと考えられる。土砂の除去をしなければ，この深さの分だけ河川水位を上昇させることにつながる。

台風19号の洪水では，小布施橋～村山橋間のうち約 2 km 区間の河道の高水敷の堆積量を推算すると平均堆積深さ23.2 cm では推定約300,185（m^3/2km）となる。これはダンプ 4 t 車75,000台に相当することになる。

5. 2 広い高水敷を持つ複断面構造の水理

(1) 河川の流れと河道横断面

立ケ花狭窄部から60k 村山橋の区間は広い高水敷を持ち複断面構造となっている。このような区間においては開水路の矩形断面とは異なり洪水時の流れは複雑な不安定流れを有することが知られている。上記の堆積土砂の調査で洪水痕跡としての土砂の挙動に関して「3）土砂堆積に関する考察」で述べたように興味深い砂漣の形成が見られた。そこで，既往の水理関係の論文から立ケ花狭窄部から村山橋間の堤防決壊前の流れを考察することにした。



図24 千曲川左岸堤防決壊と洪水流（共同通信社提供）

図24は57.5k 付近の決壊箇所を下流方向に見た鳥瞰である。ここでは堤防決壊後から洪水が低減している状況下にある。左岸高水敷の流れは決壊箇所に向かう流れが上流，下流からも形成されている。この地点は川幅950 m，低水路幅230 m である。高水敷は横断図から左岸側約300 m，右岸側約420 m である（**図25**）。河川勾配は1/1,100である。

一方，右岸側の流れは高水敷に滞留し，停滞した状況がみられる。これは高水敷に繁茂する樹林や果樹園の樹木によって高水敷の流れは滞留していることが推察される。また，低水路の流れは両側の高水敷と異なり，流心の水面に浮かぶ白濁した気泡列の流れから高水敷より早い流れであることが推察することができる。

この流れの違いを仕切っているのは両河岸の河畔林によるものと考えられる。これらは洪水時，高水敷と低水路の流れの交換を低減させていると考えられている。河畔林の帯は欧州ドイツ圏域では高水敷の樹木群と低水路とのインターフェースプレーンで rough wall と呼ばれている（Prof.Dr.-Ing.Eckhard Ritterbach）。これは河畔林の帯が流速差によって発生する渦流を出現させない役割を果たし，流れ易くさせるからである。

しかし，当該箇所は高水敷に高密度の果樹林が

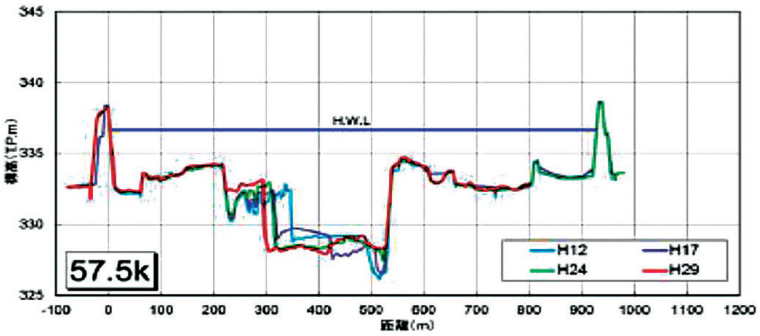


図25　千曲川左岸57.5k 堤防決壊付近の河川断面（千曲川河川事務所）

あり，洪水時は滞留し易い。また，河畔の樹林帯は粗度を大きくする。一方，低水路は洗堀が一層進行すると考えられる。河川敷の樹木は河川管理の重要な課題である。この洪水では下流の立ヶ花狭窄部によって上流の河道幅の大きい高水敷は貯留地化し，堤防天端までの水位上昇期は下流から上流に向かって水位が上昇していたものと推察することができる。

(2) 広い複断面形状の水理実験例

上記の千曲川の河道に近似した複断面形状をもつ開水路の水理現象を実験によって水平渦を三次元乱流構造として明らかにした池田らの研究（池田駿介ら1995）がある。

この研究は複断面開水路流れで発生する水平渦は，高水敷と低水路の横断方向の流速差に起因する変曲点不安定性と２列渦列の安定性という２つの要因の影響をうける複雑な現象であるとしている。複断面開水路に発生する水平渦の３次元乱流構造をレーザー流速計によって計測し，三次元の流速ベクトルを詳細に明らかにしている。図26は境界面に２列の非対称渦列を２次元で示している。高水敷の流速ベクトルは下流から上流に流れていることを示している（池田駿介ら1995）。

実験は左右に高水敷を両側対称に持ち，河川幅 B，低水路幅 b の比を変化させている（図27）。水路長14 m，水路幅40 cm であり，水路勾配は1/1,000である。この実験では高水敷の樹木相当の粗度係数は設定されてない。スケール規模を縮尺でみると小規模であるが，極めて興味深い示唆を与えている。

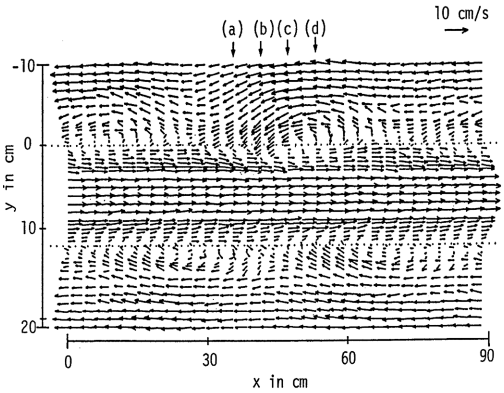


図26　境界部における流速 u_j で動く移動座標系から見た X-y 面　(z＝0.3 cm) での流速ベクトル図，(a) (b) (c) (d) の各横断図は省略[20]

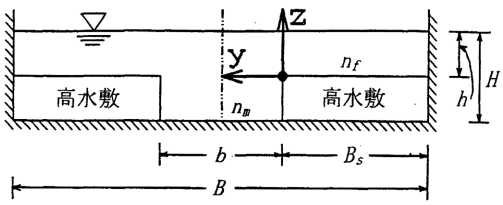


図27　複断面水路の横断図及び記号の説明（n_m，n_f）はそれぞれ低水路，高水敷のマニングの粗度係数[20]

複断面境界部に発生する水平渦に伴う流体の挙動は，高水敷上では強い２次元性が，低水路側で

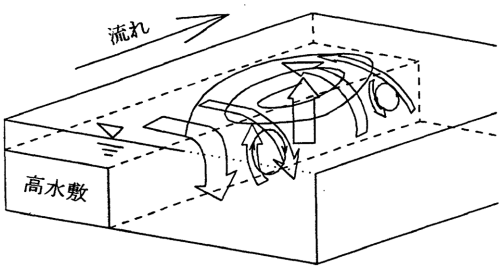


図28　水平渦に伴う低水路・高水敷間の流れの概念図[20]

は渦中心の上昇流をともなった３次元性が卓越している。このような水平渦に伴う低水路と高水敷間の流れの様子を概念的にも示している（図28）。

今回の洪水では同様な水理現象は未確認であるが，池田らの研究（池田駿介ら1995）は長野市穂保57.5k 付近の堤防決壊前の洪水流の挙動を理解するためのヒントを与えている。即ち，今後の河川管理の課題として，河川敷の堆積土砂分布とその影響，果樹木・樹林による粗度係数の評価と樹木管理，さらに堤外地の坂路の流れの影響に関しても理解を深め，洪水時の河川敷の流れを研究に繋げて行くことが課題と考えられる。

６．上田市城下地区諏訪形地先の堤防損壊と上田電鉄橋梁の崩落

6.1　桁下余裕高不足と河床変動の激しい河道

千曲川中流はセグメント区分１～2-1（Bb）に相当し，河川勾配１/200，流れは激しく河床の土砂は運搬される。104k 付近の上田市諏訪形地先の堤防左岸の橋台基礎が洗堀され約300 m にわたり欠損した（図29）。このため，上田電鉄の鉄橋一径間が落橋し，不通となった。国土交通省千曲川河川事務所の資料（2020年），京都新聞（2019年）から落橋に至るまでの状況が分かる。2019年10月13日午前７時10分頃は堤防欠損がみられたが，鉄橋は残っている。しかし，その90分後の10月13日午前８時40分にはマスコミのヘリコプター から落橋したことが伝えられている（図30）。

国土交通省千曲川河川事務所は飯山から上田までの河川管理の施設点検を行い管理区間32箇所は「警戒度合 A，B」としてリストアップしている（国土交通省2020）。諏訪形の堤防欠損箇所は警戒度合 B となっている。千曲川橋梁（上田交通）103.8k の予想される危険は「桁下余裕高不足」が指摘されていた。



図29　上田市諏訪形の堤防左岸約300 m が洗堀欠損（千曲川河川事務所）



図30　上田電鉄の落橋（2019年10月13日午前８時40分：京都新聞ネット），同箇所の水位の位置関係を加筆

この個所から約4.7 km 上流には生田水位観測所があり，台風19号の洪水では計画高水位に近い河川水位ピーク5.87m（TP.469.47 m）が記録されている。同箇所は計画堤防高（TP.470.2 m）であり，既往最大水位3.98 m を1.9 m 超えている。したがって，推算すると計画高水の勾配は1/200であるから上田電鉄橋梁付近の洪水ピーク水位はTP.446.70m となり，計画高水位を超えていたことになる。また，現地調査では，堤防洪水痕跡か

らも推定することができる。桁下余裕高不足によるため橋座などが水没していたことが推測される。信濃川水系河川整備計画の資料（国土交通省2019年12月10日）より，落橋した橋梁地点の距離標103.8kの堤防高T.P447.0 m, 計画高水位T.P445.5 m, 台風19号の洪水ピーク水位T.P446.7 mである。洪水ピーク水位は計画水位を1.2 m超えて堤防高まで0.3 mに迫っていた。これらの水位の位置関係を図30に加筆して示した。「桁下余裕高不足」が指摘されていた通りであったことになる。したがって，当該箇所の今後の検討課題は河床洗堀のメカニズムを明らかにすることが重要と考えられる。

更に，上田電鉄は堤防左右岸の橋台前後の堤防上部のり面が芝張であり，下流の上田橋の堤防のり面と比較すると明確な違いを確認することができる。上田橋（道路橋）堤防のり面は路面幅以上にコンクリートブロックで覆工されている（図31）。上田電鉄橋梁は橋座が水没し，前後ののり面も洗堀されていたものと推定される。また，河川法24，26条の占用許可，工作物の許可では，設置位置の選定基準として不適当な箇所の事例として「河床の変動が大きい箇所」が挙げられている（国土交通省平成25年７月５日改正）。また，「本基準に準拠して審査を行う」としている。河床の変動が大きい箇所は全国いたる箇所にある。

しかし，上田市城下の諏訪形地先周辺の河道・河床の変動は昭和22年９月（1947），平成元年11月（1999），平成16年11月（2004）と過去３回の上空写真の資料（国土交通省千曲川河川事務所2019）があり，砂州形成の消長は経年的に激しく，左右の御所・天神護岸整備工事（平成11，12，17，25年）が行われてきた（国土交通省千曲川河川事務所2020）。台風19号による洪水後の上田電鉄・上田橋の前後の河床変動は左岸側の砂州が一掃されている（図32）。洪水出水前後の砂州の変動も交互砂州の特有の動態を示している（図33）。直線区間の交互砂州の形成は瀬と淵が一対に形成され，河床は自励現象として必ず移動することは過去の事例でも明らかである。

同箇所は「河床の変動が大きい箇所」として認

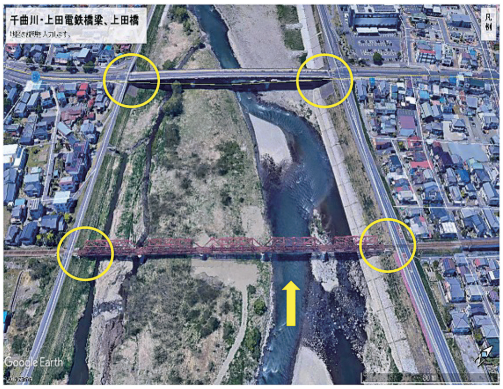


図31　上田電鉄，上田橋の左右堤防の前後のり面覆工の違い（Google Earth より作成）



図32　洪水後の上田電鉄，上田橋の前後の河床変動は図33の洪水前と比較して左岸側の砂州が一掃されている（写真：千曲川河川事務所）



図33　洪水前の河床状況。左岸側に大きな砂州がみられる（写真：千曲川河川事務所）

識されていたのであろうか。上田電鉄は大正元年開通であり，当時は明治29年の河川法の下に許可されたものと推察できるが，一旦許可されれば，公共性の高い鉄道は本基準に準拠して審査は行なわれるだろうが，既設の古い施設は更新した新しい基準に即して慎重に見直していく必要がある。また，上田電鉄橋梁の上流の諏訪形地先には根固め工，木工沈床が洗掘と沈下で損壊を受け，激流の痕跡として確認することができる（図34）。伝統工法の更なる検証が求められる。

6. 2　河川形態と水理学的考察

千曲川中流セグメント１区間では河岸侵食が激しく，蛇行の程度は少ない。河床の砂礫の粒径も同一の材料で構成される傾向にある。上田市城下諏訪形地先の左岸堤防の欠損箇所が300 m にわたっている。河岸が崩落した河道の変化を洪水前の状況と比較することによって，この中規模河床形態の特性を水理学的にみることができる。



図34　根固め工・木工沈床が洗掘と沈下を受け損壊。遠方の橋脚も傾斜している（著者撮影）

図35は洪水前年の2018年８月の砂州と澪筋（水色）の状態である。また，λ_{B1}，λ_{B2}は砂州の半波長であり，B1，B2，B3は川幅である。図36は台風19号の洪水後の2019年10月16日の砂州と澪筋である。欠損箇所前後の約２km 区間の澪筋と砂州の波長（λ）を図35と比較して見ると，澪筋ともにほぼ位相が左右河岸で逆転する大きな変化となっている。1999年から2018年まで上田橋，上田電鉄橋梁のある左岸側には大きな砂州が形成されていた（国土交通省千曲川河川事務所2020）。図36は砂州があり水衝部ではなかった箇所が，洪水後すべて水衝部となっている。このような砂州（短列）の形成は交互砂州（Alternating Bar）と定義されている。各地の河川のセグメント１（Bb）の区間では大きな洪水によって土砂は輸送され，洪水イベントのインターバルを保ちながら同様な変動が繰り返されている。これは水理的な自励現象ともいえる。

そこで，土木学会水理公式集（2010）から既往研究である中規模河床形態の領域区分の検討を試みた。表４は川幅，交互砂州の波長，粒径，水深に使用した数値の一覧である。ここで，水深 h と砂礫の代表粒径 d の比（h/d），川幅 B と水深 h の比（B/h）を当該箇所に適応した。図37の赤丸に示すように交互砂州の領域にあることがわか

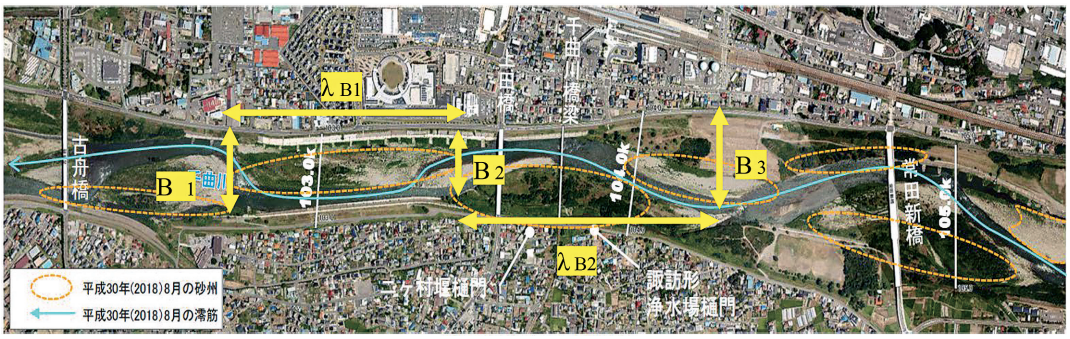


図35　上田市城下諏訪形地先の洪水前の砂州と澪筋（2018.8撮影：国土交通省資料に加筆）

る。ここで，水深 / 粒径の比は h/d：5000/19＝263，川幅 / 水深の比は B/h：265/5＝53，d＝19 mm（粗礫）で算出している（地盤工学会編2010）。

次に，交互砂州の波長と波高の関係を検討した。波高（Z_B）の定義は図38の 1 波長区間の河川断面（A–A'）の水衝部の洗堀深さを示している。この深さは堤防調査委員会の資料から，千曲川橋梁直下の砂州が最大7,100 mm 侵食し，決壊した護岸基礎からは4,000 mm 侵食している（図39の上図）。なお，護岸決壊箇所においても6,400 mm 侵食を受けている（図39の下図）。以上の検討から砂州波高と水深の関係は図40の赤点の位置となる。なお，B/h：265/5＝53，Z_B/B_2＝7/200＝0.035で算定している。水深に対して川幅が大きいほど右下へ移動し，川幅が小さいほど左上に移動している。砂州波高（Z_B），即ち，侵食深さは大きくなっている。

中流域は河川勾配1/200～1/50の急こう配である。護岸の損壊した河道は，砂礫の移動が長期にわたる自励的現象でもある交互砂州が形成される区間であることは避けられない。このような河道において基礎工は被災前の計画河床高より最深河床を重視し，基礎天端高を設定することが大切である（財団法人国土技術研究センター編2007）。その上で，瀬と淵の変動を考慮した侵食・洗堀対策のために根固め工，鋼矢板などを検討する必要がある。

7．課題とまとめ

(1) 千曲川下流直轄管理区間（セグメント区分 2–2・Bc）

・決壊した穂保地区の桜づつみ（側帯）堤防は国の桜づつみモデル事業の一つであり，河川管理施設等構造令の第24条に準じて築造された構造である。堤防には樹木を植えられないため側帯に桜を植樹し，良好な水辺空間の形成を図り，かつ水防活動に必要な土砂の備蓄場所としての機能のために側帯が位置づけられている。この側帯は堤防天端と同一面に施工されて雨水等を浸透，排水させる構造である。この排水に使用されている吸出し防止シートは本来，本体堤防の水の浸潤による土砂の吸出し防止を目的にしたものである。しかし，桜づつみ（側帯）堤防は越水により吸出し防止シート上に覆土されている裏のり土砂の崩落が発生

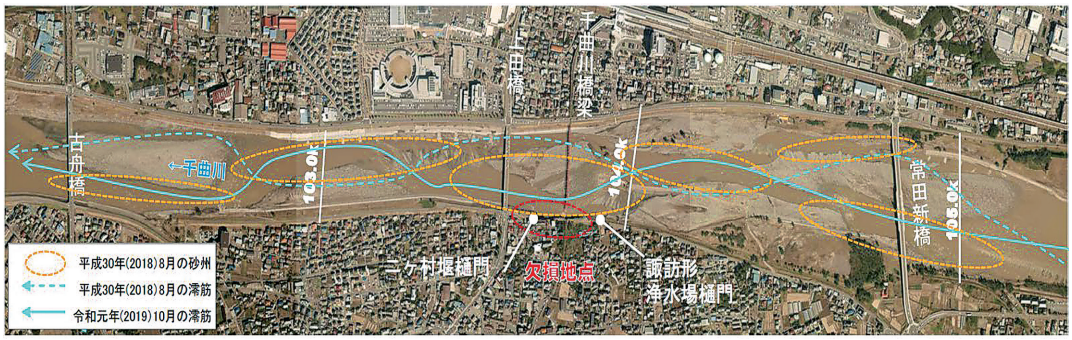


図36　上田市城下諏訪形地先の洪水後の砂州と澪筋（2019.10.16撮影：国土交通省資料）

表 4　交互砂州の波長，川幅，水深，粒径（地盤工学会2010参照）

川幅 B（m）	半波長 λ_B（m）	粒径：d（mm）	水深 h: 5m
B_1：233	λ_{B1}：720	d1：75（粗石）	B/h：265/5＝53
B_2：200	λ_{B2}：850	d2：19（粗礫）	B/h：281/5＝56
B_3：362		d3：4.75（中礫）	h/d: 5000/19＝263
平均値：265	平均値：785	d4：2（細礫）	λ_B/B＝2.963

し，この側帯の崩落から堤防決壊につながった可能性が最も大きな要因と考えられる。今後，実験による構造的検証と解明がなされる必要がある。

・坂路は広い高水敷の河川管理，果樹園等の堤外地と堤内地の利用を図るために各所に設置されている。穂保地区の決壊箇所にも坂路があり堤外地側に３箇所，堤内地側に２箇所ある。河川構造設置基準では坂路の設置が不適当な箇所として水衝部（川表部）となっている。この基準では詳細は設定されていないが，決壊・氾濫当日のマスコミの映像と地図では決壊箇所の57.5k 付近は小さい曲率であるが湾曲し水衝部となっている。また，工作物設置許可基準では坂路は計画堤防内に設置しないことを基本とするとしている。河川施設管理構造令に即し，これらの課題の検証が必要となる。

・高水敷の堆積土砂・果樹木調査の区間はセグメントでは２あるいは Bc 区分にあり，河川勾配1/1100の緩勾配にある。下流の立ヶ花狭窄部から上流の村山橋付近までは，河川敷の樹林・果樹園

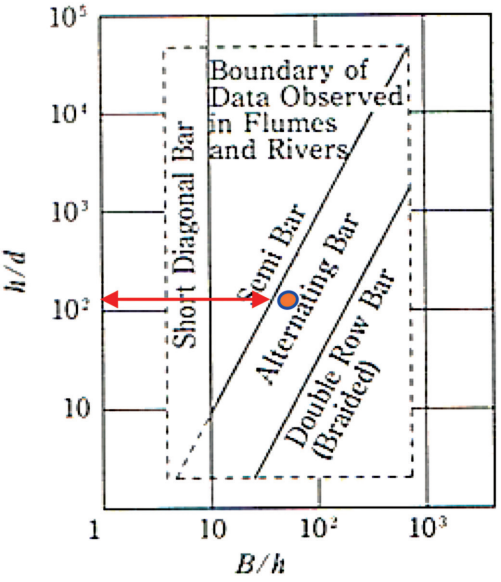


図37　中規模河床形態の領域区分（土木学会水理公式集，平成11年版７刷・平成22年１月）に加筆

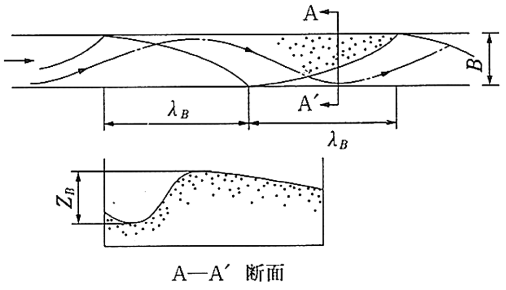


図38　交互砂州の波長と波高の定義（土木学会水理公式集，平成11年版７刷，平成22年１月）

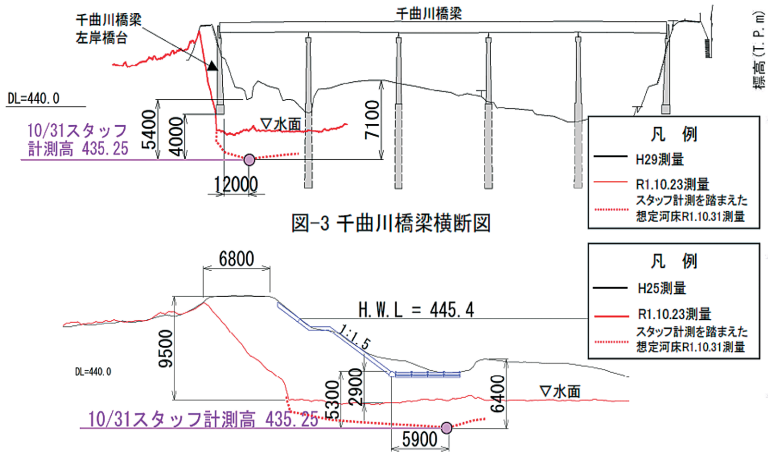


図39　千曲川橋梁横断図と左岸決壊箇所の想定河床の計測高（国土交通省堤防調査委員会資料）

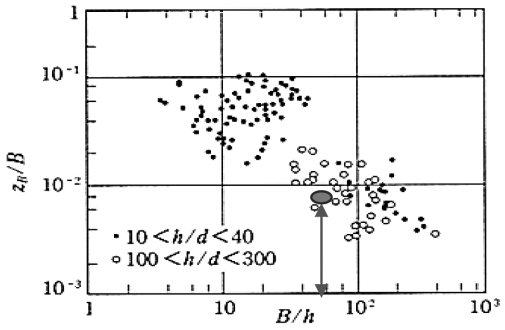


図40　砂州波高と水深の関係（土木学会水理公式集，平成11年版７刷・平成22年１月）

などの影響もあり，洪水時の流れは貯留池化している。

・河道の高水敷における植樹の基準で果樹木の密度の評価を行った。調査箇所のリンゴ果樹の平均密度0.024本 /m^2，栗樹木の平均密度0.023本 /m^2 は１ha 当たりにすると其々240本 /ha，230本 /ha となる。現在の果樹木は超過密した高水敷になっている。

・洪水時，高水敷の堆積土砂は膨大な堆積量となり堤防管理においても無視できないものと考えられる。低水路だけでなく，高水敷も計画的な調査と掘削が必要である。

・距離標55.3k–57.3k の区間は河道掘削の必要性が令和元年８月の河川整備計画でも指摘されていた。今後，計画的で持続的な掘削が必要となる。

・河川敷の樹木の計画的伐採，私的所有である果樹木の適切な河川管理が求められる。

これらを粗度係数として評価し，河川管理に反映する必要がある。そのためにも河道の複断面構造のもつ洪水時流れの水理現象を２，３次元的にも把握する必要がある。

・河川敷の果樹木，樹林の適切な管理，浚渫などがなければ，今後も計画規模相当の降雨でこれを超えない洪水でも長い河道区間の脆弱な箇所で越水につながるものと推察される。

(2) 千曲川中流直轄管理区間（セグメント区分1〜2–1・Bb）

・上田電鉄の鉄橋の左岸堤防，橋台の洗堀崩壊，一径間の落橋である。同箇所は国土交通省千曲川河川事務所の河川管理の施設点検管理区間32箇所の「警戒度合 A, B」としてリストアップしていた。堤防欠損箇所は警戒度合 B となっていた。予想される危険として「桁下余裕高不足」である。当該箇所を含む早急な鉄橋の架け替え工事が期待される。また，全国各地の橋梁でも「桁下余裕高不足」箇所多い。流木などによる二次被害が発生していることからも重要な課題と考えられる。

・当該管理区間は河川勾配１/200〜１/60の急こう配である。護岸の崩壊した河道は交互砂州が形成される区間にあり，洪水による砂礫の移動が流体力による自励的現象として瀬と淵の形成は避けられない。このような河道において基礎工は被災前の計画河床高より最深河床を重視し，基礎工天端高を設定することが大切である。その上で，交互砂州の変動を考慮した侵食・洗堀対策のためには根固め工，鋼矢板などを検討する必要がある。

謝辞

千曲川水害調査を行うにあたり国土交通省北陸地方整備局，同千曲川河川事務所の関係者の方々には被災後のご多忙の中，資料情報をいただくことができた。また，千曲川中流・下流の現地調査及び情報収集では塩野敏昭氏（応用地質学・（株）北信ボーリング），中山俊雄氏（防災地質学・東京都庁）の各位には地質研究の立場から協力と助言もいただきました。改めてご協力いただきました皆様に感謝する次第である。

なお，この調査の一部は日本自然災害学会及び京都大学防災研究所・自然災害研究協議会「2019年台風19号に関する初動調査（科学研究費）」の助成によるものである。

引用及び参考文献

1）国土交通省：災害・防災情報，https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_191012.htm，2019年11月20日.

2）消防庁：災害対策本部第57報 https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/taihuu19gou57.pdf，2019年11月21日.

3）気象庁：台風第19号による大雨暴風等，令和元年10月10日～10月13日，19p.，2019.
4）信濃毎日新聞：特集ニュース「台風19号長野県内豪雨災害」（2019.11.1）http://www.shinmai.co.jp/feature/tyhoon19/
5）沖野外輝夫：河川生態学，共立出版社，pp.7-12，2003.5.
6）山本晃一：構造沖積河川学－その構造特性と動態，山海堂，12p.，2004.
7）毎日新聞：2019年10月28日，全国版・朝刊
8）国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所，http://www.hrr.mlit.go.jp/chikuma/，2019年12月10日.
9）国土交通省：工作物設置許可基準，平成6年9月22日，建河治発第72号，最終改正平成14年7月12日，国河治第71号.
10）国土交通省：河川管理施設等構造令，平成25年7月5日改正.
11）国土交通省北陸地方整備局，www.hrr.mlit.go.jp/gijyutu/kaitei/sek.../003_kasen.pdf，河川編，pp.18-19.
12）信濃毎日新聞：2019年10月18日，総合・日刊
13）毎日新聞：2019年10月18日，全国版・朝刊
14）毎日新聞：2019年10月15日，全国版・夕刊
15）国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所 http://www.hrr.mlit.go.jp/chikuma/chikuma_river/pdf/setsumei/01_0227_setsumei.pdf，2020年2月27日
16）国土交通省北陸地方整備局千曲川事務所，http://www.hrr.mlit.go.jp/chikuma/chikuma_river/，河川維持管理計画，2019年12月10日.
17）内藤武美：千曲川洪水と土地割地（地割）慣行制度，長野県不動産鑑定士協会誌，鑑定しなのNO.11，pp.37-47，2004.
18）財団法人リバーフロント整備センター：河川における樹木管理の手引き，山海堂，pp.183-193，1999.
19）Prof.Dr.-Ing.Eckhard Ritterbach: Computer Alded Methods for River Restoration, RWTH Aachen University, pp.8-12 http://www.rwth-aachen.de/
20）池田駿介・村山宣義・空閑　健：複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造，土木学会論文集No.509/II-30，pp.131-142，1995.
21）国土交通省千曲川河川事務所，http://www.hrr.mlit.go.jp/chikuma/bousai/suibou/index.html，2020年1月8日.
22）京都新聞：上田電鉄の橋が一部崩落・長野，2019年10月13日.
23）地盤工学会編：土質試験の基本と手引き，丸善出版，264p.，2010.
24）土木学会：水理公式集，技報堂（平成11年版7刷），pp.182-185，2010.
25）財団法人国土技術研究センター編：護岸の力学設計法改訂版，山海堂，pp.96-98，2007.

（投稿受理：令和2年7月13日
訂正稿受理：令和3年2月22日）

要　旨

2019年10月12日，台風19号は関東・甲信地方から東北地方にかけて大河川の流域に総降雨量300 mm～500 mm豪雨を降らした。そのため東日本の各地で堤防決壊，越水氾濫が発生し，人命・財産をはじめ生活や産業など多くの分野に甚大な被害をもたらした。

本報ではこのうち千曲川で大きな破壊を受けた河川構造物の堤防，護岸の損壊状況について調査報告をしている。特に，越流決壊した桜づつみ（側帯）堤防は近い将来に向けて構造上の検証がなされる必要がある。一方，高水敷の堆積土砂及び果樹木調査では洪水が膨大な土砂堆積量をもたらし，果樹木などは樹木管理の基準を超過していることも分かった。これらの結果は，今後の河川管理においても重要な課題と考えられる。また，地形，地質の視点である河川のセグメント区分及び河川管理の視点から現地調査と関係機関の資料から水害の要因を水理学的にも考察し，今後の課題を明らかにすることを目標とした。