

千曲川旧河道の形成過程と土砂の堆積構造、 基盤漏水位置との関係

佐藤 豊¹・福岡捷二²

¹会員 株式会社 キタック (〒950-0965 新潟県新潟市中央区新光町10番地2)

E-mail:satoh_yt@kitac.co.jp

²フェロー 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail:sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp(Corresponding Author)

堤防基盤の漏水に伴う破壊は、基盤の表層土質構造に密接に関係することが、現地や模型の堤防で確認されている。基礎地盤の表層土質構成を把握するものとして、治水地形分類図があるが、基盤漏水を考慮して作成されたものではないため、旧河道は明瞭、不明瞭での表記であり、旧河道の形成過程や漏水との関係を読み取ることはできない。本研究は、旧河道の河道形成が読み取れる地形分類図を作成し、現地調査等を実施し、旧河道の新・旧区分を行うことで基盤漏水に影響のある旧河道を抽出できることを示した。また、地質縦横断面図から旧河道と氾濫原の土質構成を調べた結果、表層粘性土が3m以下の旧河道付近で漏水が発生することを示した。さらに、200m程度の範囲内で旧河道に囲まれている氾濫原では噴砂を伴う漏水が発生しやすいことがわかった。

Key Words: water leakage, former river channels, soil characteristics, sand boiling

1. はじめに

洪水氾濫リスクを考える上では、堤体及び基礎地盤の浸透を一体的に捉えていく必要がある。堤防弱点箇所に関する研究では、福岡ら¹⁾による堤防脆弱性指標²⁾を用いて堤体漏水や破壊発生の可能性が高い箇所を推定することが可能となったが、基盤漏水については、堤防模型実験を用いて水みちの形成等のパイピング変形を主体とした研究が中心で危険箇所の推定は困難な状況にある。堤防基礎地盤においても、堤体浸透破壊で示された³⁾に準ずる基礎地盤への浸透のしやすさに基づいて、基礎地盤の泥濘化、変形、破壊に至る兆候をつかむ検討が必要と考えている。

現状では、堤防弱点箇所の抽出は、1~2kmと広間隔でのボーリングデータと200m間隔の堤防横断面図から求めているのが現状である。品川ら²⁾は、地形分類が基盤の表層土質構成を反映していることを示しており、基盤漏水の弱点箇所の抽出には、地形分類ごとの評価を行うことが重要である。千曲川では、基盤漏水発生位置の多くは、堤防と旧河道との交差部で発生しており、漏水が生じやすい旧河道の地形特性を調べる必要がある。治水上重要な治水地形分類図には、旧河道が明瞭か不明瞭かの区分で示されており、漏水と関係する旧河道の形成過

程、周辺地形(支川)の影響、地下水との関係等を読み取ることが困難である。

本研究では、千曲川の氾濫原について、旧河道の形成過程を読み取り、旧河道の特性(形状、連続性、交差状況)を調べ、堤防基盤の漏水が表層土質構成、地下水分布、堤防との交差状況とどのような関係にあるかについて検討し、明らかにしている。

2. 検討方法

千曲川において、米軍撮影の空中写真の判読や文献資料に基づいて作成した旧河道分布に山地、扇状地、氾濫原等の地形、さらに断層を加えた地形分類図を作成した(図-1)。千曲川で発生した基盤漏水は、昭和57~平成25年で78箇所発生している。そのうち、75箇所が千曲川氾濫原(図-1の25kp~80kpの範囲)において、堤防と旧河道が交差する付近で発生している。本研究は、この図から盆地や旧河道形成過程を検討し、旧河道の形状や現地調査に基づく周辺地形との段差の状況から、新・旧の旧河道を区分し、基盤漏水に影響する旧河道の特性を調べた。次にボーリング調査から作成した地質縦断面図を用いて、旧河道と氾濫原の堆積土砂の構造を明らかにし、基盤漏水の発生箇所を検討した。さらに国土交通省国土技術政

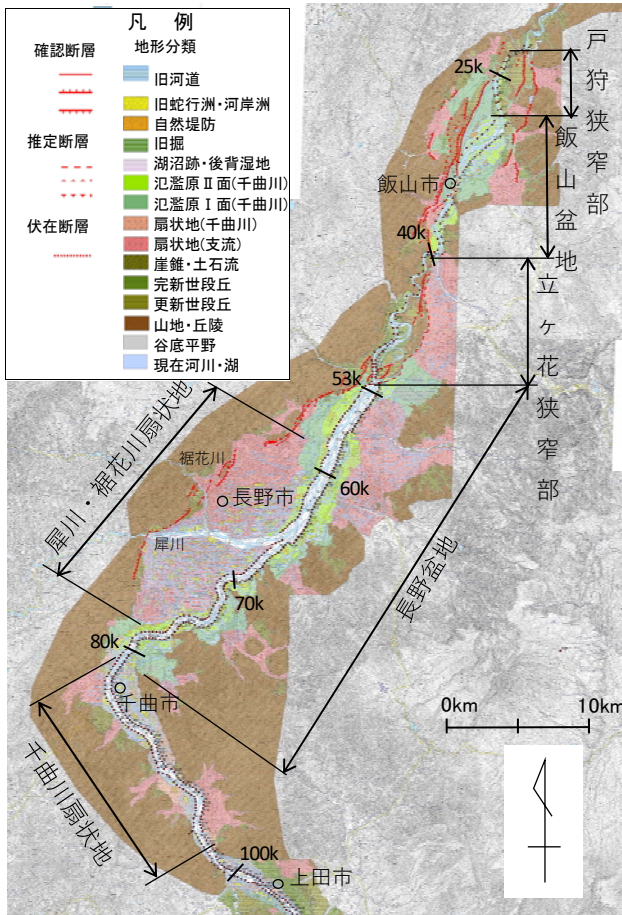


図-1 千曲川の旧河道分布を含む地形分類図

策総合研究所で公開されている河川堤防の土質試験結果を用いて、千曲川全域の旧河道と氾濫原の粒度特性、透水係数を調べた。これらを用い、旧河道と堤防の交差状況と漏水形態の関係を調べ、最後に、地形や土質特性から漏水対策工について考察した。

3. 盆地と旧河道の形成過程

長野盆地および飯山盆地は、図-1に示すようにいずれもその長軸方向を北東-南西方向とする細長い盆地である。盆地の西縁部は断層で境され、山麓は直線的な地形を形成している。一方、東縁部は、河東山地から伸びる尾根の間を北から樽川、夜間瀬川、松川、百々川、保科川の扇状地が発達する。これら、東縁部の扇状地堆積物は山地側（東側）ほど古く、盆地側（西側）ほど新しく、古い時期の扇状地ほど傾斜が急である。これは、図-2のように盆地および河東山地が、北西方向に傾く傾動運動をしているためである³⁾。この傾動運動は、現在も進行しており、飯山盆地北方、飯山盆地・長野盆地間はそれぞれ、戸狩狭窄区間、立ヶ花狭窄区間と呼ばれ、この区間は地盤の隆起地帯であり、河道幅が急激に狭くなる。

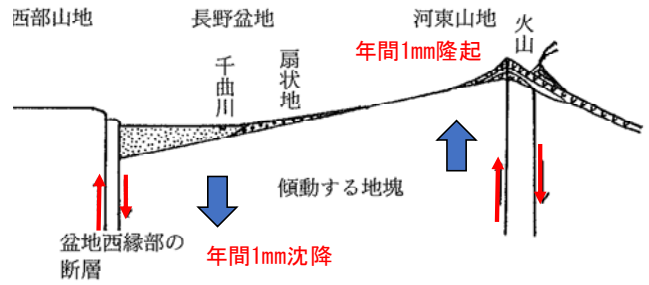


図-2 長野盆地を横断する模式断面図³⁾に一部加筆

(1) 長野盆地の旧河道の形成過程と形状

図-3に示すように長野盆地を流れる千曲川は、西側からの犀川・裾花川扇状地の影響によって東側に追いやられ、東側は傾動運動の沈降によって山地の尾根部分がリアス式海岸状を呈し(図-3の四角で囲まれた範囲)、山間の低地部分を通じていた蛇行状の旧河道が読み取れる。旧河道の幅は現河道の河幅と同程度である。現地調査では旧河道の痕跡を示す1m程度の段差をみる事ができる。犀川・裾花川扇状地の地盤の勾配が0.3~2%程度に対して、東側の5つの支川の扇状地勾配はいずれも4~12%程度と急勾配となっている。また、各支川の扇状地の旧河道は網状を呈しておらず、直線状に伸びている。以上から、長野盆地では、千曲川はかつて東側の丘陵沿いを流れていたが、傾動運動によって現在の河道を流れており、旧河道は右岸側で多くみられる。現在の河道は、図-3の横断面図に示すように最も地盤の低いところを流れている。

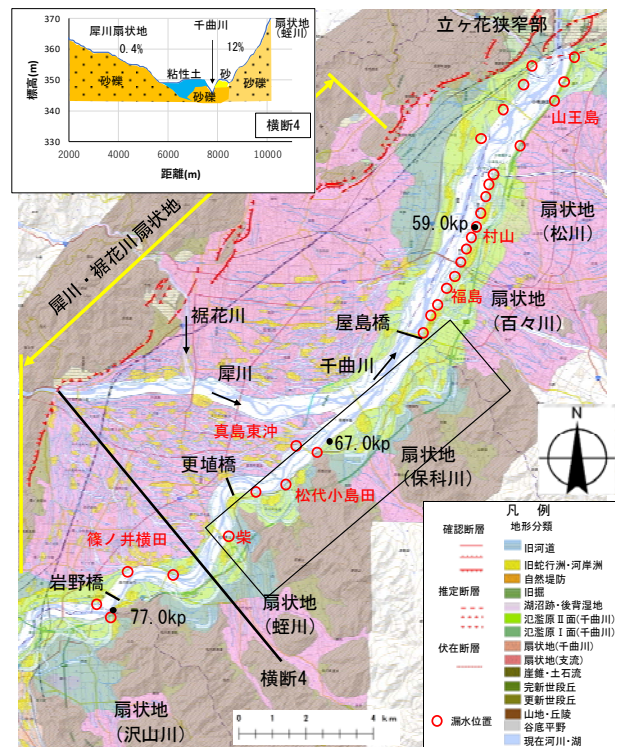


図-3 長野盆地の旧河道分布を含む地形分類図

(2) 飯山盆地の旧河道の形成過程と形状

飯山盆地の旧河道分布を含めた地形分類図を図-4に示す。飯山盆地は、長野盆地と同様に盆地の西側にある断層の東側の沈降によって形成された。図-4に見られるように中央橋付近の千曲川河道は、常盤断層に規制され、断層沿いを流れている。中央橋左岸は飯山市街地であり、市街地にある旧河道は常盤断層の西側に平行する長峰山断層によって規制されていることがわかる。かつては飯山市街地に連続蛇行形状を呈していたものと考えられ、これら断層の運動によって河道が短絡化されていったものと考えられる。

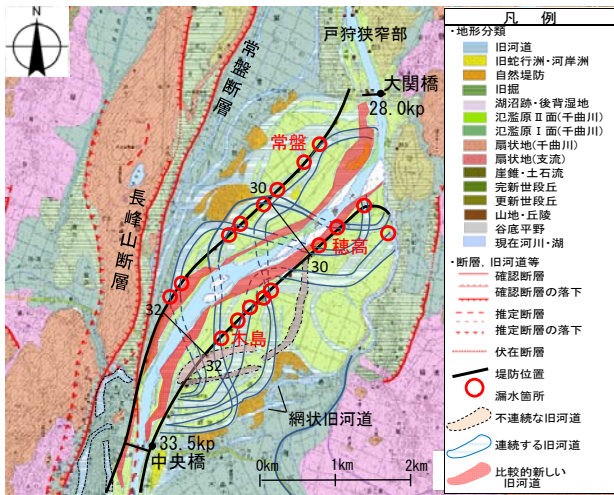


図-4 飯山盆地における旧河道形状の分類⁹⁾に加筆

図-4に示すように中央橋から下流では、蛇行状の旧河道が複雑に分布している。これらの旧河道では、大関橋上流の丘陵部分に流れがぶつかり、下流の戸狩狭窄部へと流下する。洪水ごとに流れを変えながら、古い旧河道は分断され取り残されていった。漏水が発生している旧河道の河幅と蛇行振幅に着目して左右岸に分断された旧河道をつなぎあわせると4つの蛇行状の旧河道が読み取れる。右岸側では、この蛇行状の連続した旧河道の外側に不連続な旧河道がみられる。この旧河道の幅は蛇行状の旧河道の幅よりも小さく網状を呈している。また、現在の河道付近には、直線状の比較的新しい旧河道(赤色部分)がみられる。これらの形状から、盆地の形成(地盤の沈降や断層による短絡化)によって旧河道は網状、蛇行状、直線状に変化してきたものと考えられる。右岸側にみられる蛇行状の旧河道について、現地調査を行った。連続する旧河道(図-5の連続1)は不連続な旧河道面よりも低い位置に分布しており、1m程度の段差が確認できる。分断された旧河道どおしの段差は不明瞭である(図-5の写真, 図-6)。漏水が発生している旧河道は、連続した新しいもので、古い旧河道よりも低い位置に分布していることから、河川水位との差が大きくなり、漏水が発生しやすいと考えられる。

4. 千曲川氾濫原の土砂堆積構造と漏水位置の関係

(1) 長野盆地の土砂堆積構造と漏水位置の関係

a) 表層土質構成

長野盆地を流下する千曲川の地質断面図と漏水位置を図-7に示す。堤体直下の基礎地盤は、表層部に粘性土と砂質土が分布し、以深に砂礫層が厚く分布している。粘性土、砂質土の層厚は1~3m程度である。小高ら⁹⁾、上野ら⁶⁾の堤防基盤漏水の模型実験では、基礎地盤が複層で下位層の透水係数が大きい場合には、大洪水時にはパイピングにより堤防の変状が大きくなることが報告されている。長野盆地の氾濫原の土質構成は、同様な土質構成である。

b) 漏水発生箇所の関係

長野盆地の漏水発生箇所は、犀川合流(65kp付近)から上流の右岸では現河道と同程度の川幅の旧河道との交差付近で発生している。図-7の地質縦断面図をみると旧河道部分には、粘性土が薄く分布し、砂質土(氾濫原)との境界付近で漏水が発生している。左岸側の地質(図-3の横断4)は、傾動運動により右岸に比べ粘性土が厚く分布しているが、自然堤防部分(図-3の真島東沖、篠ノ井横田)では粘性土が薄くなり、漏水が発生している。屋島橋(63kp付近)から下流も横断図4と同様の地質構成で右岸側

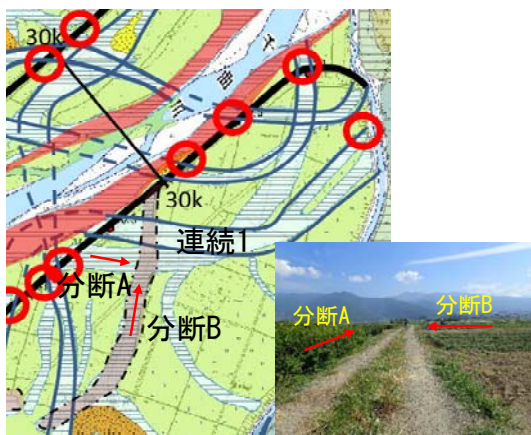


図-5 穂高地区の旧河道の交差状況

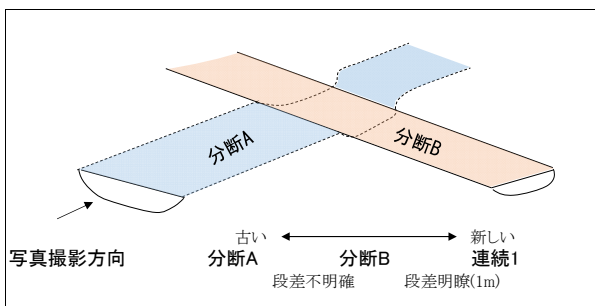


図-6 上記写真の模式図

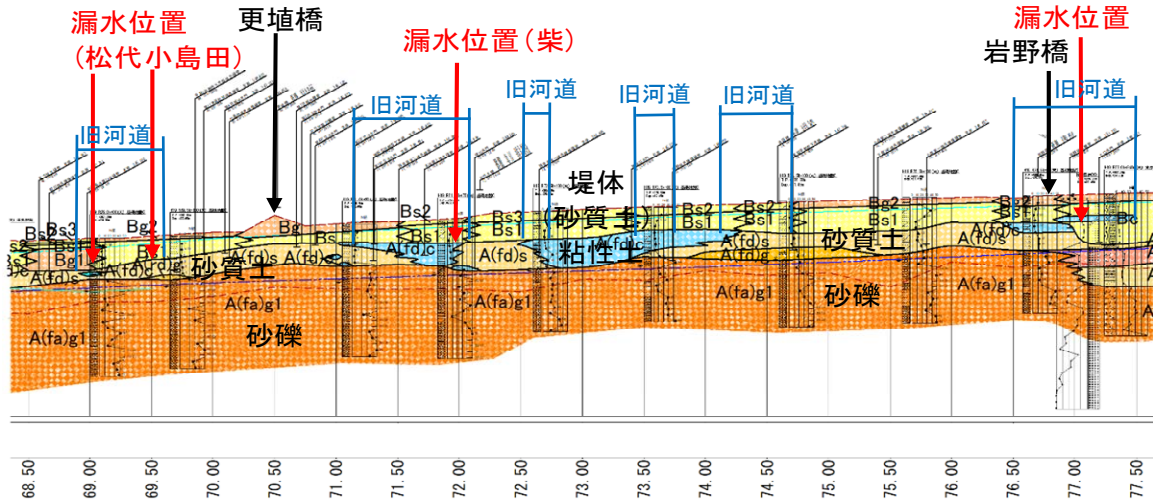


図-7 長野盆地の地質縦断面図(70~77kp 右岸)

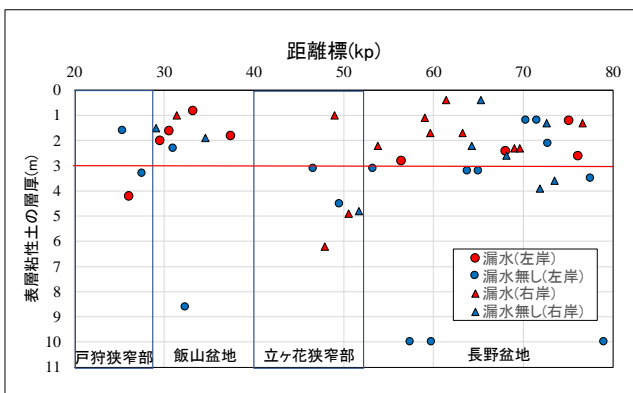


図-8 表層粘性土の厚さと漏水発生の有無

で多く漏水が発生しており、左岸側では粘性土が厚く分布しており、漏水の発生は少ない。

図-8には、千曲川氾濫原(距離標20~80kp)における表層粘性土の厚さと漏水発生の有無を調べた。狭窄部では人工埋土による漏水発生箇所では4~6m程度の厚さで発生しているが、盆地の氾濫原における漏水発生の表層粘性土の厚さは3m以下である。左岸側では表層粘性土の厚さが10m以上と厚く分布する箇所がある。

(2) 飯山盆地の土砂堆積構造と漏水位置の関係

a) 表層土質構成

飯山盆地の地質断面図を図-9に示す。大関橋から下流には戸狩狭窄部があり、粘性土が厚く分布する。大関橋から上流では堤体直下の基礎地盤の表層土質は粘性土、砂質土、礫混り砂が分布し、以深には砂礫が厚く分布している。飯山盆地は千曲川下流域であることから砂礫の粒径が小さくなり、砂質土を多く含むようになる。漏水発生箇所は、大関橋から上流で表層に粘性土が薄く分布し、以深に砂質土が分布している。図-10には、千曲川全体の氾濫原(上図)と旧河道(下図)の表層土質の粒度特性を示した。砂分とシルト分の境界に入れた折れ線を見ると氾濫原が全体に礫、砂分が多いことがわかる。氾濫原の礫+砂分の平均値は46.5%、シルト+粘土分の平均値は53.6%である。一方、旧河道の礫+砂分の平均値は23.5%、シルト+粘土分の平均値は76.5%である。

図-11には旧河道と氾濫原の透水層(主に砂礫層)の透水係数の関係を示した。同図から、旧河道部分の透水層の平均透水係数(累乗平均)は $k=8 \times 10^{-5} \text{m/s}$ であり、氾濫原

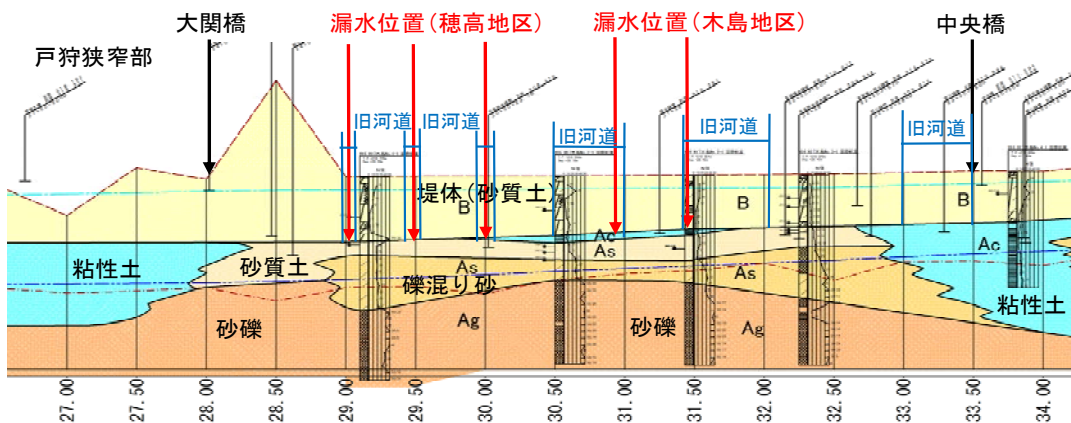


図-9 飯山盆地の地質縦断面図(23~32kp 右岸)

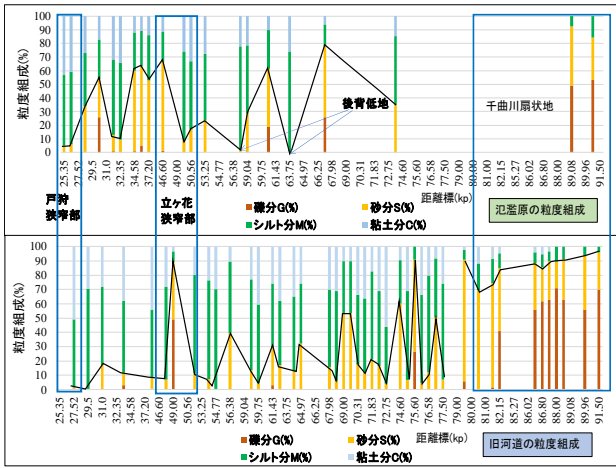


図-10 千曲川の旧河道と氾濫原の表層土質の粒度組成

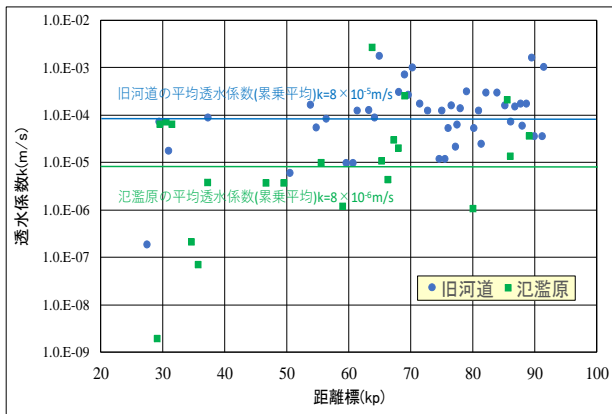


図-11 千曲川の旧河道と氾濫原の透水層の透水係数分布

の透水層の平均透水係数(累乗平均)は $k=8 \times 10^{-6} \text{m/s}$ と旧河道の透水係数が1オーダー大きい。旧河道と氾濫原について、著者らの、穂高地区をモデルに浸透流解析を行った裏のり尻の水圧分布は、旧河道が大きくなることや、飯田地区(左岸58kp付近)での地下水位観測結果は旧河道で地下水位が高くなることに対応していると考えられる。

b) 漏水発生箇所の関係

飯山盆地の漏水発生は、図-4に示した4つの連続した旧河道と現堤防の交差付近に見られる。氾濫原の漏水は、網目状に旧河道で囲まれた位置で発生している。長野盆地では、蛇行帯幅が小さいため、堤防と旧河道で囲まれる氾濫原の面積が小さく、旧河道からの浸透の影響を受けやすく、噴砂が発生しやすい。飯山盆地では、蛇行帯幅が大きくなるため、堤防と旧河道で囲まれる面積が大きくなる。穂高地区(右岸29.5kp付近)の氾濫原では噴砂の発生はなく、旧河道と堤防の交差部で漏水が発生している(図-12)。対岸の左岸29.2kp付近の常盤地区(図-13)や上流の右岸59.0kp付近の村山地区(図-3)では、旧河道で囲まれた面積が小さく、氾濫原で噴砂が発生している。図-14は、漏水発生位置での河川水位差 H と堤防前面水際から旧河道までの距離 L をプロットしており、両者に

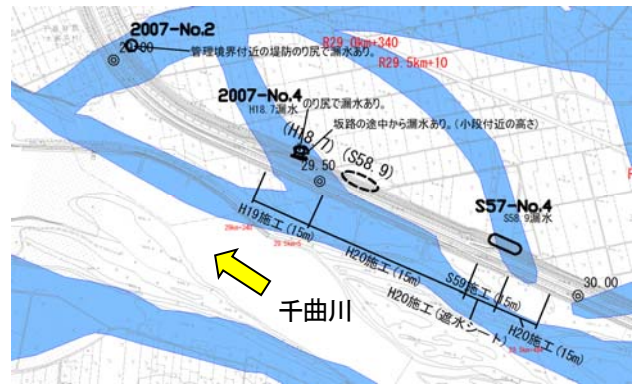


図-12 旧河道と堤防の交差状況と漏水発生位置(穂高地区右岸29.5kp付近)

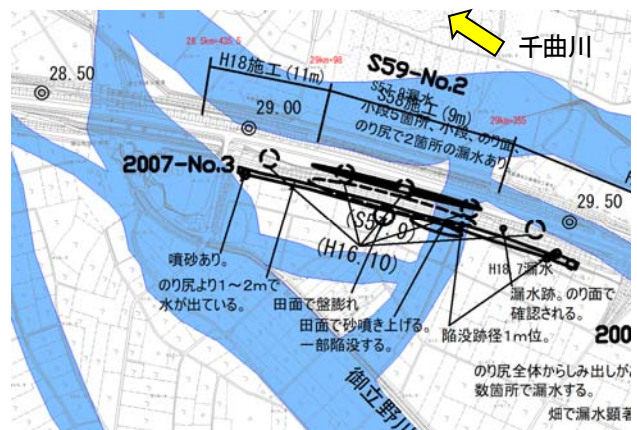


図-13 旧河道と堤防の交差状況と漏水発生位置(常盤地区左岸29.2kp付近)

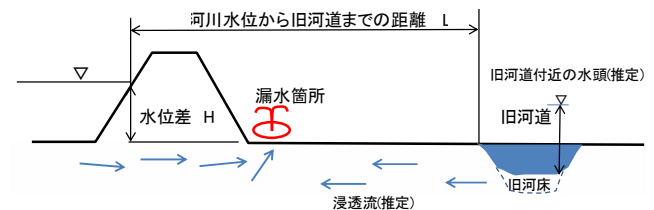
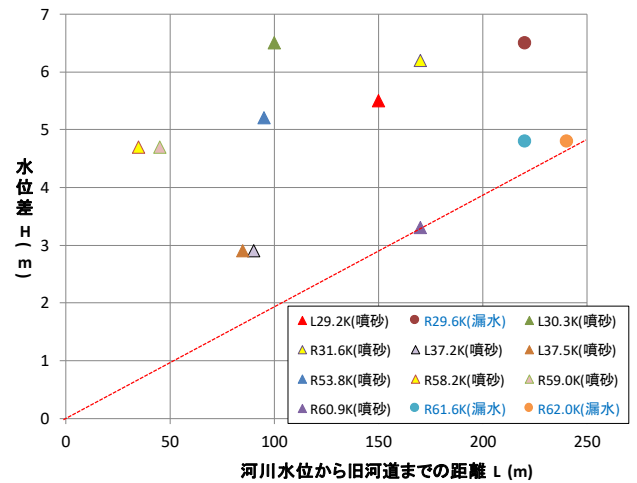


図-14 漏水発生位置での水位差と堤防前面水際から旧河道までの距離の関係

明確な関係は認められないが、旧河道までの距離が200m程度までは浸透の影響が大きく、噴砂が発生し、200m程度を超えると漏水のみの発生となっている。

5. 漏水対策工の考察

千曲川では、昭和57,58,59年の洪水による漏水対策として、漏水範囲を中心に遮水矢板を施工するとともに堤防断面の拡築を行ってきた。平成18年洪水の漏水対策は、堤内地に河川水を浸透させない工法で遮水矢板工+遮水シート工法を用いている。千曲川ではこれまでの施工実績から15m以上の矢板打設が困難であることから、必要とする長さが15mを超える場合には、補助工法として堤防裏のり尻に堤内基盤排水工が設置されている。図-13に示した常盤地区は、常襲型漏水の発生箇所として昭和57年、平成16年、平成18年の洪水において漏水が発生している。旧河道で囲まれた範囲が200m程度内にある場合には、部分的に遮水矢板を施しても再び漏水が発生しており、旧河道と氾濫原を1つのユニットとして捉え連続的に対策することが重要である。また、常襲型漏水は、堤防直下に水みちが形成されている可能性があり、遮水矢板で河川水を堤防内に入れない工法で水みちを進行させないことが肝要である。

6. まとめ

基盤漏水の弱点箇所の抽出には、旧河道分布を含む地形分類図の作成が重要である。同図から旧河道の形成過程が読み取れ、旧河道の蛇行幅、河幅、段差状況から新・旧の旧河道を区分でき、漏水に影響する旧河道を識別することができる。地質縦横断面図から旧河道の表層土質は粘性土、氾濫原の砂質土であり、旧河道と堤防が交差する付近で漏水が発生する。傾動運動により千曲川右岸側で粘性土が薄く分布し、表層粘性土が3mよりも薄く分布する箇所でも漏水が発生する。透水層の透水係数は、

旧河道が氾濫原よりも1オーダー大きいことがわかり、旧河道で200m程度の範囲で囲まれた氾濫原では噴砂を伴う漏水が発生しやすいことがわかった。漏水対策にあたっては、漏水の可能性のある旧河道と氾濫原を1ユニットと捉え連続的に対策することが重要である。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 田端幸輔: 浸透流を支配する力学指標と堤防浸透破壊の力学的相似条件-浸透流ナンバーSF_nと堤防脆弱性指標 t*, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, I_1435-I_1440, 2018.
- 2) 品川俊介, 日外勝仁, 佐々木靖人: 地形種と動水勾配を用いた河川堤防基礎地盤の浸透安全概略評価指標, 第3回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.72-75, 2015.
- 3) 信州大学「信州の4億年」編集委員会: 大地が語る信州の4億年, pp.251,254,1994.
- 4) 佐藤豊, 大淵貴, 上野優, 福岡捷二: 河川堤防の基盤漏水発生箇所と旧河道の関係, 第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.17-20, 2017.
- 5) 崔瑛, 小高猛司, 李圭太, 森三史郎, 林愛実: 高透水性基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊メカニズムの検討, 第28回中部地盤工学シンポジウム, pp.81-88,2016.
- 6) 上野俊幸, 笹岡信吾, 森啓年, 中村賢人, 福島雅紀, 諏訪義雄: 模型実験に基づいた河川堤防のパイピング発達に係る土質条件の分布, 河川技術論文集 第23巻, pp.405-410, 2017.
- 7) 佐藤豊, 大淵貴, 福岡捷二: 旧河道の地下水分布と堤防周辺の基盤漏水発生箇所の関係, 第6回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.33-36, 2018.

(Received June 30, 2020)

(Accepted August 28, 2020)

RELATION BETWEEN FORMATION PROCESS OF FORMER RIVER CHANNELS OF THE CHIKUMA RIVER AND SEDIMENTARY STRUCTURES AND LOCATIONS OF FOUNDATION LEAKAGE

Yutaka SATO and Shoji FUKUOKA

Locations of foundation leakage at the levee toe can be identified by the creation of landform classification maps. This map explains the processes of former river channels form, and classifies former river channels into old ones and new ones. Investigations on the soil compositions and permeability coefficients of former river channels and flood plains clarified that former river channels are associated with locations where water pressure is relatively high. With regard to how the locations of former river channels and levees are related to foundation leakage, it was found that foundation leakage with sand boiling tended to occur at levees situated about 200m off former river channels.