

千曲川堤防における裏のり尻付近の 基盤漏水・噴砂発生箇所土質・地下水位 と旧河道特性の関係

RELATIONS BETWEEN FOUNDATION LEAKAGE, SOIL CHARACTERISTICS,
GROUNDWATER LEVEL AND FORMER RIVER BEDS
AT THE LANDSIDE LEVEE TOE OF THE CHIKUMA RIVER

佐藤 豊¹・河原 武志²・大淵 貴³・福岡 捷二⁴

Yutaka SATOH, Takeshi KAWAHARA, Takashi OHBUCHI and Shoji FUKUOKA

¹正会員 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)

²国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所調査課 (〒380-0903 長野県長野市鶴賀字峰村74)

³工修 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)

⁴フェロー 工博 PhD 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The distribution of former river beds in alluvial fans and floodplains has been investigated in the Chikuma river. Relations between levee, soil characteristics, groundwater level, and former river beds at the landside levee toe are studied for prevention of levee breach. The soil characteristics are investigated by simple field tests of Swedish weight sounding along the landside levee toe. Based on the spatial relation of the levee and the former river beds and height difference among groundwater, ground surface, and Swedish sounding tests, locations of foundation leakage and sand boilings were able to be found.

Key Words : foundation leakage, former river beds, width of meander, soil characteristics

1. はじめに

河川堤防は、ダム群とともに最も重要な治水施設であり、流域治水の視点¹から堤防の浸透に対する安全性の確保が一層求められている。河川堤防の浸透に対する弱点箇所抽出方法として有効な堤防脆弱性指標は、洪水水位、継続時間、堤体透水係数、堤防幅、空隙率の組み合わせで求められ、堤体危険箇所の推定が可能であり、さらに基盤への浸透を考慮した堤防脆弱性指標も明らかにされている²。基盤漏水のパイピングに伴う堤防変状については、崔・小高³、齊藤・前田⁴、上野⁵、笹岡⁶は模型実験で堤体・基礎地盤の土質及び構成との関係を調べており、筆者ら⁷は梯川の堤防変状箇所の土質構成等と模型実験データ結果を比較検証することで、堤防弱点箇所の抽出手法を示している。また、筆者らは、千曲川下流(距離標25～40k付近)において空中写真判読した旧河道について、断層の運動等を踏まえた河道形成の把握により、旧河道の新旧区分を行うことで基盤漏水発生箇所との関係を示した⁸。さらに旧河道と氾濫原の表層土質の相違を示した。

本研究は、千曲川上中下流(距離標25～86.5k付近)の旧河道形状及び堤防との交差状況、堤防破壊に影響を及ぼす裏のり尻付近の土質・地下水位との関係を、現地データをもとに検討し、弱点箇所の抽出方法を検討した。また、旧河道と氾濫原の表層土質を効率的に把握する調査方法を検討している。

2. 検討方法

千曲川では、河道の形成過程を踏まえ空中写真判読から抽出した地形分類図を作成している(図-1)。本研究では、昭和57年～平成18年出水で発生した基盤漏水箇所を旧河道分布との関連で整理し、基盤漏水発生区間で詳細調査を実施した6地区(表-1)で堤防裏のり尻付近の土質縦断面図を作成した。土質縦断面図は、1～2k間隔で実施されているボーリング調査を補完するためのスウェーデン式サウンディング試験を実施し、裏のり尻付近の地盤面を基準とし、土質区分した。

これらから、①旧河道の形状、②旧河道と堤防の交差状況、③漏水箇所と健全箇所の土質特性の違い、④地下水

位と地盤面の関係を比較検討し、⑤堤防裏のり尻沿いの漏水発生箇所の特徴を考察し、これにより、堤防弱点箇所抽出方法を検討した。

表-1 検討地区の河床勾配、地形分類、漏水状況

地区名	区間延長 (km)	代表位置	河床勾配 (計画)	地形分類	漏水状況
穂高	0.5	右岸29.4k	1/1,000	氾濫原	漏水のみ
相之島	0.85	右岸57.6k	1/700	氾濫原	漏水のみ
村山	2.3	右岸59.0k	1/700	氾濫原	噴砂あり
福島	0.6	右岸61.5k	1/700	氾濫原	漏水のみ
八幡	1.5	左岸83.9k	1/400	扇状地	漏水のみ
須坂	0.6	右岸86.1k	1/350	扇状地	漏水のみ

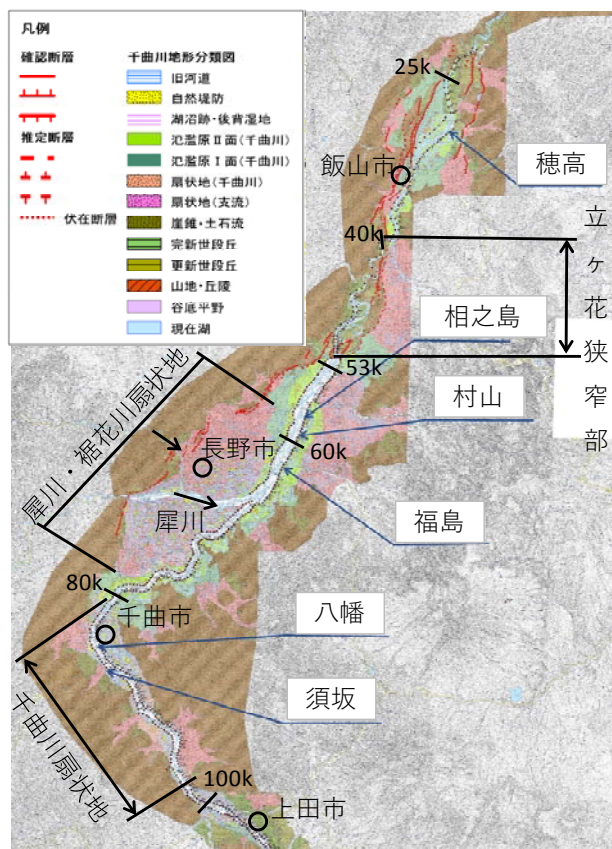


図-1 千曲川の地形分類図と漏水検討位置

3. 千曲川の河道と特徴

千曲川は、甲武信岳を源に佐久市、上田市(距離標100k付近)を北西方向に流れ、千曲市(距離標80k付近)で北北東方向に流れる。距離標80k～100k付近までは、千曲川は山地に規制されながら流れ谷底堆積低地状⁹⁾を示す。ここでの旧河道は網状流路状を呈し、点在型自然堤防がみられる扇状地にある。距離標80k付近から下流で流れを北北東方向に変え、河床勾配が1/860～1/1,470と緩くなり、蛇行河川となる。長野盆地の中央付近から犀川が流入し、典型的な扇状地形を呈する。千曲川はこの

扇状地に追いやられるように東側を流れる。長野盆地西側に西縁断層が分布し、この断層の活動によって、断層東側が沈降し、長野盆地を形成している。

長野盆地における千曲川は、旧河道の分布位置から、かつては半島状に突き出た丘陵間の低地部分を流れていた。盆地の西側が沈降し、東側山地の隆起によって西側に流れを移している。また、江戸時代の松代城付近では大規模な瀬替えが行われ、現在の河道位置となっている。

犀川合流後は、旧河道の蛇行帯幅が小さくなり、現河道は直線状流路となる。盆地の沈降・隆起運動によって千曲川右岸側の支川の扇状地が発達し、松川扇状地が迫り、この扇状地上に千曲川の氾濫堆積物が分布している。左岸側は、後背低地が分布し、堤防直下に粘性土が厚く分布している。

距離標40～53k付近は、立ヶ花狭窄部の隆起地帯で穿入蛇行の流れとなり、距離標40k付近から下流で飯山盆地を流れ、蛇行状の旧河道が左右岸に分布し、現在の河道は蛇行した旧河道を分断して直線状に流下している。

4. 各地区における基盤漏水の検討結果

(1) 千曲川扇状地(距離標80～100k付近)の基盤漏水(八幡地区、須坂地区)

八幡地区：①旧河道形状は網状で(図-2)、②旧河道と堤防の交差はほぼ平行である。③土質特性は、表層1m前後の層厚で礫混り砂が連続して分布している(図-3)。④地下水位は砂礫層中に分布し、⑤漏水発生箇所は、表

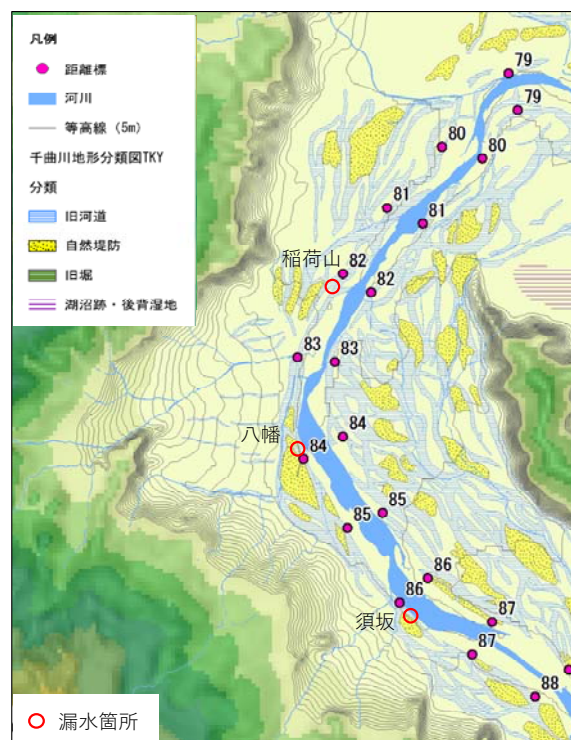


図-2 八幡、須坂地区の旧河道分布と周辺地形¹⁰⁾

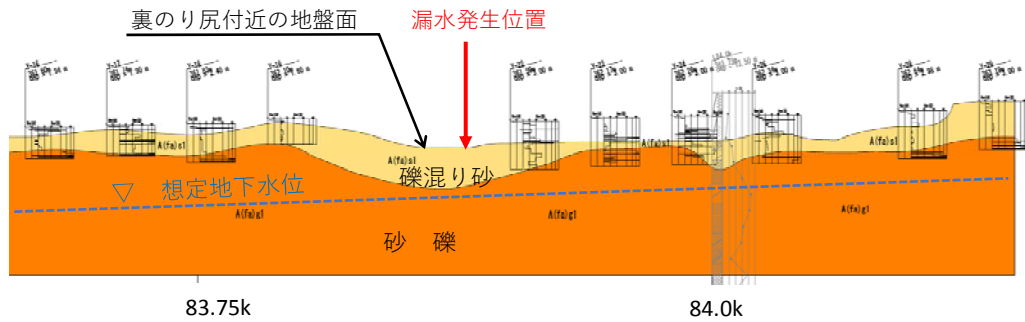


図-3 八幡地区の堤防裏のり尻付近の土質縦断面図

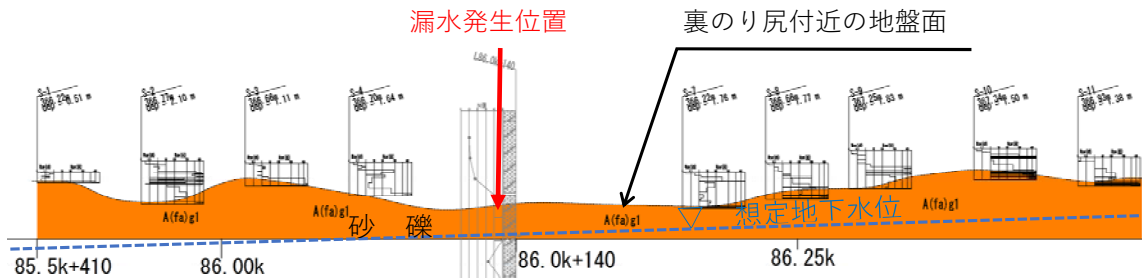


図-4 須坂地区の堤防裏のり尻付近の土質縦断面図

層より透水層の砂層が全体に分布することから、河川の増水に伴う地下水位の上昇によって、地表面付近に水圧が集中する箇所が無い。このため、漏水箇所は地盤面が最も低い位置で発生している。漏水形態は、表層土質の土粒子が粗い砂、砂礫であることから漏水のみである（筆者らが梯川堤防の漏水発生箇所と健全箇所の粒径加積曲線の整理⁷から、漏水のみの範囲にある）。

須坂地区：①旧河道形状は網状で、②旧河道と堤防の交差は平行～斜めである。③土質特性は、表層より砂礫が厚く分布し、旧河道部分と以深の砂礫層の境界は不明である（図-4）。④地下水位は砂礫層中に分布し、⑤漏水発生箇所は、八幡地区と同様に地盤面が最も低い箇所が発生している、標高段彩図（図-5）でも漏水箇所が周辺に比べ低地であることが読み取れ、抽出方法のための一つのデータとなる。漏水形態は、土粒子移動が少ない砂礫のため漏水のみである。

図-2にみられるように左岸側では右岸側に比べ流域面積の大きい支川が分布し、地下水涵養が大きく、千曲川が左岸寄りを流れていることから、河川水の増水によっ

て堤内地側の地下水位が上昇しやすい状況にある（地表面に地下水が浸出しやすい状況）。谷底堆積低地状を示す千曲川扇状地では、周辺地下水の涵養を受けた漏水形態である。一方、典型的な扇状地形を示す犀川堤防では、周辺地下水の涵養が少なく漏水実績は無い。

(2) 氾濫原（長野盆地）の基盤漏水（福島地区、村山地区、相之島地区）

福島地区：①旧河道形状は蛇行状で、②堤防は旧河道上に構築されており、③土質特性は表層全体に粘性土が分布する（図-6）。④地下水位は堤内地盤下3m程度の砂礫層中に分布している。⑤漏水発生箇所は、粘性土が薄く分布し、河川増水により地下水位が上昇し、砂礫層が凸状となる部分に水が集中する。漏水形態は粘性土、砂礫の構成で土粒子移動が少ない土質のため漏水のみの形態である。

村山地区：図-7に示すように①旧河道形状は蛇行状で、②堤防と斜めに交差し、旧河道の蛇行帯幅Bが約130mで、現堤防敷幅bは約45mで、敷幅に対する旧河道の蛇行帯幅の割合B/bをみると約3である。③土質特性は、図-8から旧河道で粘性土が分布し、氾濫原部分で砂質土が分布する。スウェーデン式サウンディング試験結果の値をみると粘性土で W_{sw} (荷重)=1kN以下と小さく、砂質土は N_{sw} (半回転数)=50前後と明瞭に土質が区分できる。④地下水位は堤内地盤下3m程度の砂礫、砂質土中に分布する。⑤漏水発生箇所は、旧河道と粘性土の境界付近で発生し、上流側では粘性土、砂質土層が層厚1m程度と薄く分布し、漏水のみで、下流側では砂質土層の層厚が2～3mと厚くなり、噴砂を伴う漏水で、平成18年出水では最も規模の大きい漏水である。この漏水発生箇所の

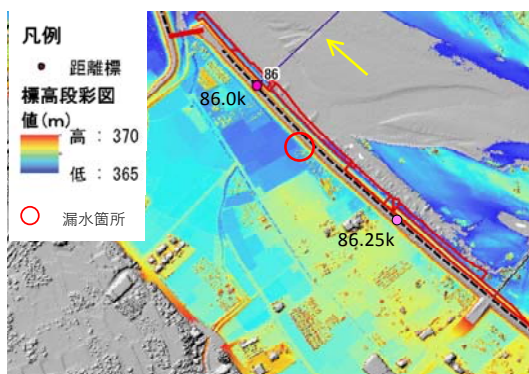


図-5 須坂地区の標高段彩図と漏水発生箇所

下流は、昭和24年キティ台風洪水による決壊箇所、最も砂が厚く分布している。当時の堤防断面を旧堤防部分の形状で堤防脆弱性指標を求めると $t^*=5 \times 10^{-3}$ で田端、福岡ら¹¹⁾が全国の河川で求めた指標と比較すると堤体浸透の範囲にある。

相之島地区：図-7に示すように①旧河道形状は緩やかな蛇行～直線状で、②堤防の裏のり尻付近に平行して分布する。③土質特性は、図-9の地質断面図を代表として表層全体に粘性土、砂質土が分布する。④地下水位は堤内地盤下3m程度の砂質土層中に分布し、⑤漏水発

生箇所は、砂質土層の出現深度が浅い箇所が発生している。漏水形態は、堤内地側で旧河道の粘性土が厚く分布し、以深の砂質土は細粒分を含むため、漏水のみが発生する。

表-2には3地区の洪水時の裏のり面のすべり円弧について、のり尻～堤内地側で噴砂が発生した場合に、強度低下を受ける影響円弧長(土被りが少なく、パイピング破壊が発生しやすいのり尻から堤内地側にかかる砂層部分の円弧長)とすべり円弧全長との割合(影響割合)を整理した。筆者らが先に検討した梯川堤防の右岸8.4kの古府

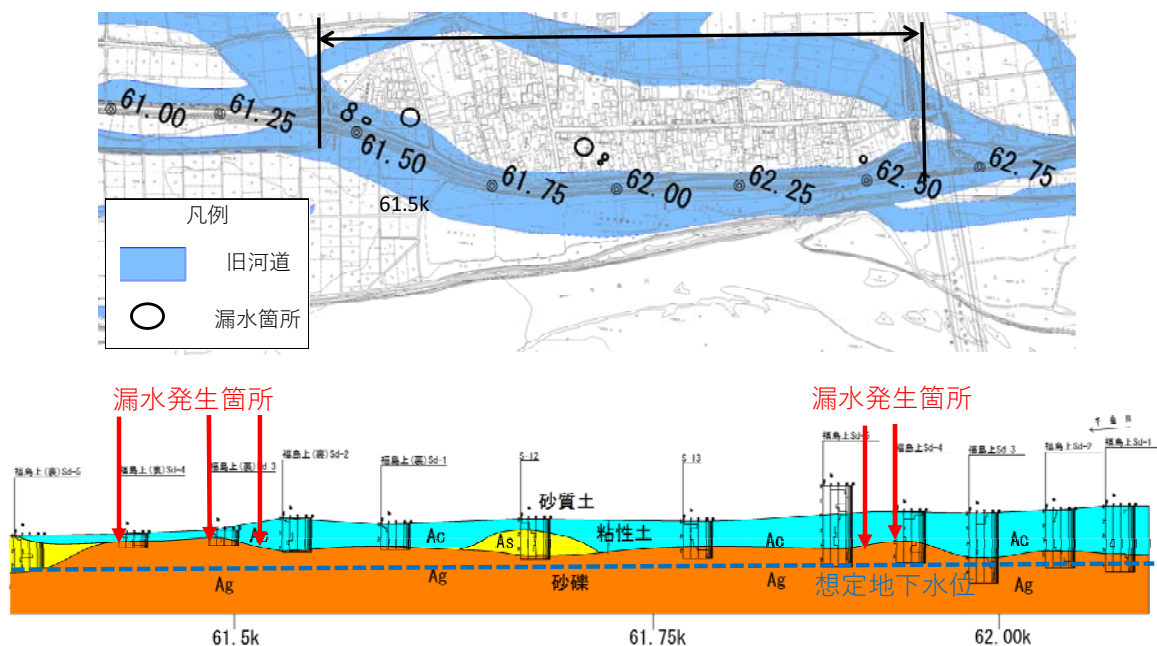


図-6 福島地区の堤防裏のり尻付近の土質縦断面図と漏水発生位置、旧河道との関係

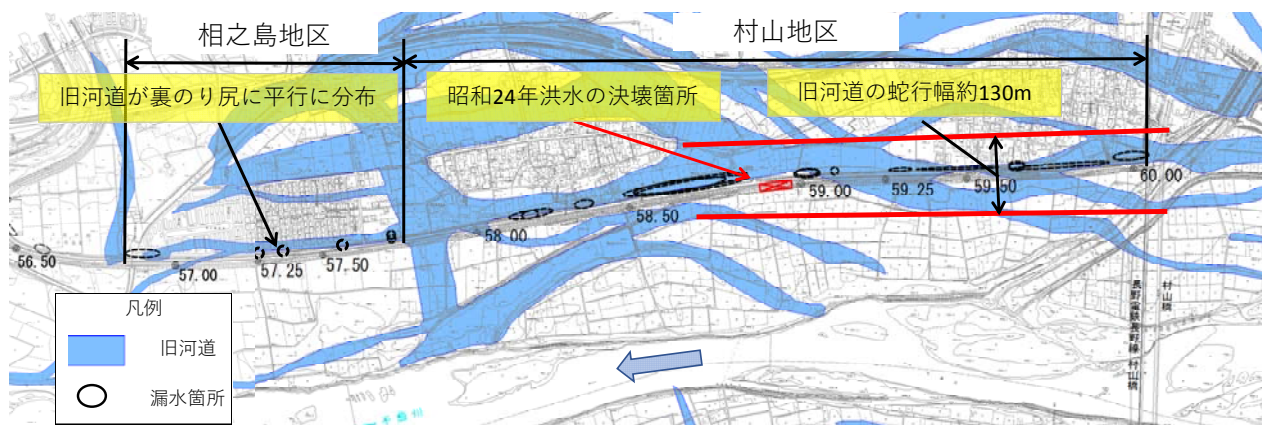


図-7 相之島、村山地区の旧河道分布図

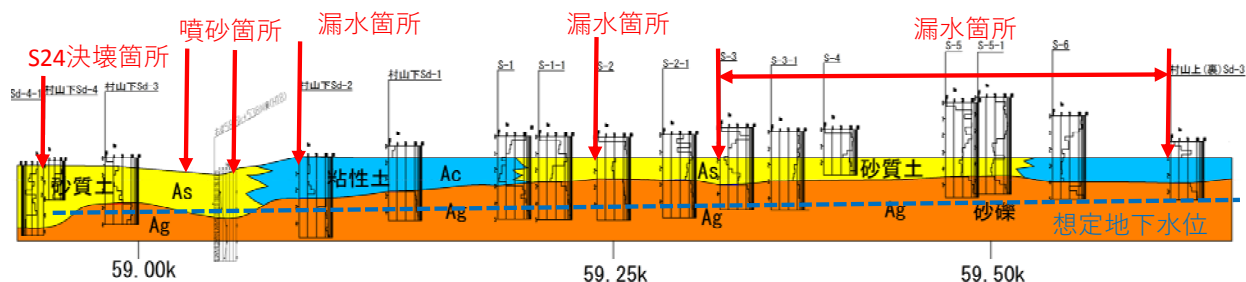


図-8 村山地区の堤防裏のり尻付近の土質縦断面図

表-2 旧河道と堤防の交差状況と噴砂によるすべり円弧の影響割合

地区名	変状形態	旧河道との交差状況	表層土質と層厚		安全率	噴砂の影響円弧	
			粘性土	砂質土		影響長	影響割合
福島	漏水のみ	旧河道上	1m	0m	2.80	-	-
村山(現堤)	噴砂	斜め交差	0m	3m	1.27	3.5m	21%
村山(旧堤)	(決壊)	斜め交差	0m	3m	1.43	3.5m	19%
相之島	漏水のみ	裏のり平行	1.5m	3m	2.27	3m	16%
古府(梯川)	すべり	斜め交差	0.5m	2m	1.05	3m	24%

安全率：洪水時の裏のり面の最小安全率

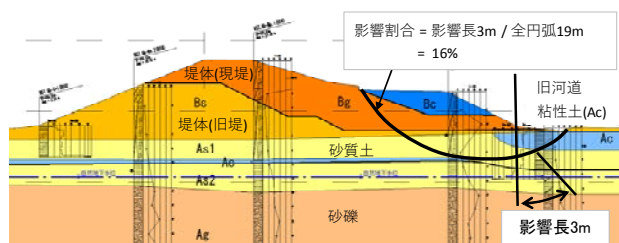


図-9 相之島地区(57.6k)の地質断面図

ではすべり破壊に至ったが⁷⁾、影響割合が最も大きいことがわかる。すべり破壊が発生する要因は、噴砂が発生するのり戻つま先部分の長さで噴砂が発生する砂層の厚さが影響する。相之島地区のように旧河道の粘性土がのり戻部にある場合には安全率の低下が小さい。したがって、旧河道と堤防が斜めに交差し、つま先部分に氾濫原の砂質土が分布する場合には、すべり破壊の危険性が大きいものと考えられる。

(3) 氾濫原(飯山盆地)の基盤漏水(穂高地区)

①旧河道形状は蛇行状で、②堤防との交差は、蛇行帯幅Bが約1,350mと大きく、直行するように交差する。堤防敷幅bとの比B/bは約23となる。③土質特性は、図-10に示すが、旧版治水地形分類図をもとにスウェーデン式サウンディング試験のみで作成した図-11には旧河道2が反映されていない。図-10は、氾濫原の砂質土の細粒含有率が多く、旧河道の粘性土と類似し、スウェーデン式サウンディング試験の強度では差異が無いいため、直接土質観察できる検土杖による調査で土質縦断面図を作成した。また、土質縦断面図の地盤面は、堤防裏のり戻付近の高さを反映し、地表面の起伏を表している。この起伏は図-12に示した標高段彩図でも読み取れ、旧河道2の部分が明瞭にみることができる。

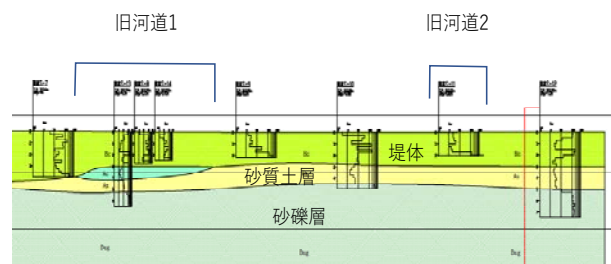


図-11 旧版治水地形分類図をもとに作成した堤防裏のり戻付近の土質縦断面図¹²⁾

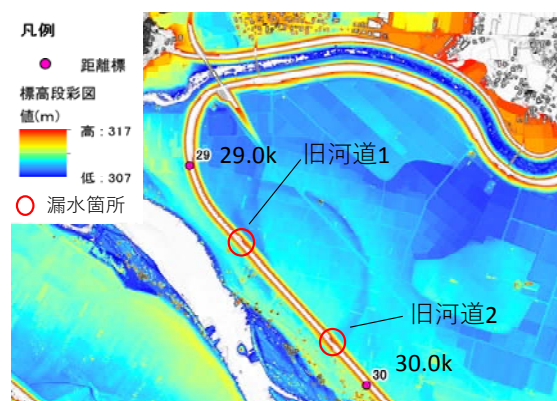


図-12 穂高地区の標高段彩図と漏水発生箇所

④地下水位は、砂礫(Rg)、礫混り砂(Dsg)に分布し、⑤漏水箇所は、地下水面と地表面との距離が短い箇所(旧河道の低地部分)で、表層土質が粘性土で噴砂無しの漏水のみの形態である。

図-10で特に着目すべき部分は、スウェーデン式サウンディング試験結果で氾濫原部分の砂礫層(Dsg)は、強度が大きくほとんど貫入不能な状態であるが、旧河道部分の砂礫層(Dsg)は2m程度貫入できる強度である。この部分は、旧河道部分の旧河床堆積物の砂礫と推定され、オーガーボーリングによるサンプリングを行い、粒度試験を実施した(S-1,S-2,S-3)。旧河床堆積物(Rg；砂礫)と氾濫原の砂礫層(Dsg；礫混り粗中砂)を比較すると旧河床堆積物が全体に粗い粒度組成であり、クレーガーの近似式から求めた透水係数で比較するとS-1の旧河床堆積物(Rg)で $k=5.4 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、S-2の氾濫原砂礫層(Dsg)で $k=9.3 \times 10^{-5} \text{m/s}$ と1オーダー程度旧河床堆積物が大きい値を示す。

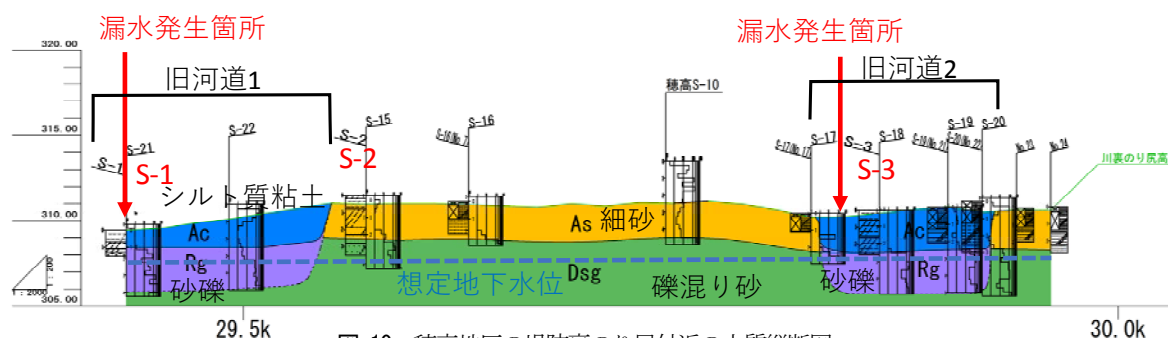


図-10 穂高地区の堤防裏のり戻付近の土質縦断面図

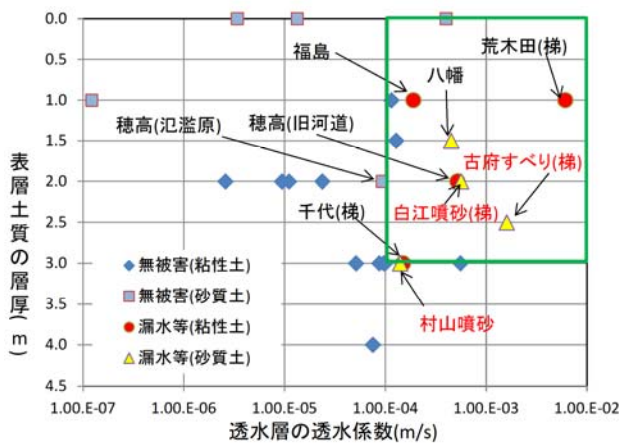


図-13 透水層の透水係数と表層土質の層厚の関係⁷⁾

図-13には、梯川堤防で整理した透水層の透水係数と表層土質の層厚の関係図に氾濫原S-2の砂礫層(Dsg)の透水係数をプロットした場合、漏水の発生しない範囲となるが、旧河道S-1の河床堆積物(Rg)の透水係数の場合、梯川堤防の漏水範囲にある。漏水発生は、透水層の透水係数が大きく影響しており、漏水形態は、表層土質が砂質土の場合には噴砂を伴う漏水が発生する。

5. まとめ

本検討のまとめを表-3に示す。基盤漏水発生箇所を抽出する方法は、まず机上調査で空中写真判読した旧河道分布を反映した地形分類図を河川全体で作成することで、上流～下流の旧河道形状、蛇行状況が俯瞰的に把握できる。詳細調査では、堤防と旧河道の交差状況を踏まえた堤防裏のり尻付近の土質縦断面図で、表層土質の区分を行い、砂、砂礫層の起伏や地下水位との関係を整理するこ

表-3 検討結果まとめ

検討地区		穂高	村山	福島、相之島	八幡、須坂	犀川
机上調査	地形分類	氾濫原(飯山盆地)	氾濫原(長野盆地)		扇状地(谷底堆積低地)	扇状地
	河床勾配	1/1,100	1/700		1/700	1/500
	旧河道の形状	蛇行状(B=1,350m)	蛇行状(B=130m)	蛇行状(B=130m)	網状	網状
	旧河道と堤防の交差	ほぼ直角(B/b=23)	斜め交差(B/b=3)	平行(B/b=0)	様々	様々
詳細調査	調査データ	土質縦断面図	土質縦断面図	土質縦断面図	LPデータ	地形分類図
	弱点箇所の抽出方法	地下水位と地盤面距離が短い箇所	表層に砂層が2～3m程度分布	地下水が浅い透水性層が地表面近くに分布	凹地で堤内からの地下水涵養あり	周辺からの地下水涵養無し
漏水形態		漏水のみ	噴砂	漏水のみ	漏水のみ	漏水無し

B/b: 蛇行帯幅B / 堤防敷幅b

必要とする調査 … SS: スウェーデン式サウンディング試験、

AB: オーガーボーリング等

とで漏水箇所、漏水形態の抽出が可能である。抽出するための調査方法は、1～2km間隔で実施されているボーリング調査を補完するスウェーデン式サウンディング試験で土質縦断面図を作成することが可能で、河床勾配が緩くなる箇所では氾濫原と旧河道の土質が類似するため、直接土質観察できる検土杖調査等が必要である。扇状地では、周辺支川と河川との位置関係、標高段彩図によって地盤の低い箇所、周辺地下水の影響を受けやすい箇所での漏水のみが発生する。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて、河川技術論文集 第23巻, pp.251-256, 2017.
- 2) 福岡捷二, 田端幸輔：堤体基礎地盤の透水性・堤防強化対策を考慮した堤体内非定常浸潤線解析法の開発と堤防破壊危険確率の低減効果の見積りに関する研究, 河川技術論文集 第22巻, pp.261-266, 2016.
- 3) 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.
- 4) 齊藤啓・前田健一・泉典洋：基盤漏水に伴う噴砂及びパイピング進行条件の検討, 河川技術論文集 第22巻, pp.251-256, 2016.
- 5) 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.
- 6) 笹岡信吾, 上野俊幸, 森啓年, 中村賢人, 福島雅紀, 諏訪義雄：大型模型実験に基づく河川堤防におけるパイピング発達過程の考察, 河川技術論文集 第23巻, pp.417-422, 2017.
- 7) 佐藤豊, 大淵貴, 福岡捷二：梯川における基盤漏水が発生する地形・地質及びパイピングによる堤防破壊, 土木学会論文誌B1(水工学)Vol.74, No.4, 2018.
- 8) 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.
- 9) 古今書院 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門 第2巻 低地, pp.359, 1998.
- 10) 赤羽貞幸, 上林好之, 富所五郎, 福岡捷二：沖積平野における縄文以来の河道と堤防形成過程に関する研究, 要約版, 財団法人河川管理財団, 平成19年度河川整備基金助成金事業, pp.92, 2008.
- 11) 田端幸輔, 福岡捷二, 内堀寿美男, 上村勇太：堤防脆弱性指標に基づいた堤防破壊危険性評価に関する研究-鬼怒川中下流部平成27年9月大洪水を例として-, 河川技術論文集 第23巻, pp.387-392, 2017.
- 12) 国土交通省北陸地方整備局 千曲川河川事務所：平成16年度千曲川中流堤防詳細点検調査業務報告書, 2004.

(2018. 4. 3受付)