

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変状

佐藤 豊¹・大淵 貴²・福岡捷二³

¹非会員 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非会員 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)

E-mail:Obuchi_tk@kitac.co.jp

³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)

E-mail:sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

本論文は、空中写真からの旧河道判読と土質構造を河川縦断方向で整理することによって、基盤漏水が発生する旧河道の抽出、土質構造の関係を検討し、堤防弱点箇所への抽出検討に資することを目的とする。梯川堤防の漏水実績から、基盤漏水発生箇所は氾濫原と谷底平野の境界付近の旧河道で発生し、主に基礎地盤の透水層の透水係数とその上位にある表層の土質と層厚に関係することが確認された。また、古府地区の3箇所の漏水発生に伴う堤防変状形態の比較検討から、パイピングと堤防変状の関係は、パイピングが発生する砂粒子の粒度特性とその砂層の層厚、分布深度及びすべり滑動側の荷重を示す堤防形状に影響されることを示した。

Key Words: seepage, piping, sand boiling, levee failure, abandoned river

1. はじめに

2012年7月の九州北部豪雨による矢部川の堤防決壊(右岸7.3k)は、基盤漏水によるパイピングが原因とされている。決壊箇所の地形は、旧河道と現堤防の交差付近で発生しており、上流側右岸11.8kにおいても旧河道付近で堤体の陥没、漏水が発生している¹⁾。本稿で報告する梯川においても、基盤漏水は旧河道付近で発生していることが確認されている。このように基盤漏水の発生箇所は旧河道との関係が深い。しかし、必ずしも旧河道との交差付近で発生しているとは限らず、堤防弱点箇所を精度良く予測し、重点箇所の堤防監視を行うことが重要と考える。田端・福岡ら²⁾が提案している堤防脆弱性指標は堤防の危機管理対策、堤防管理を行う上で重要な指標となり得るものであるが、さらなる精度向上のためには、旧河道の分布特性、基礎地盤土質の縦断的特性と基盤漏水との関係を検討し、これを考慮する必要がある。

また、基盤漏水のパイピングに伴う堤防変状については、崔・小高ら³⁾、齊藤・前田ら⁴⁾、上野ら⁵⁾、笹岡ら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いる。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

手法の精度向上に寄与できるものとする。

本論文では、空中写真からの旧河道判読と土質構造を河川縦断方向で整理することによって、基盤漏水が発生する旧河道の抽出、土質構造の関係を検討し、堤防弱点箇所の抽出検討に資することを目的とする。

2. 梯川堤防の基盤漏水発生箇所と地形・地質の関係

梯川は、小松市内を流れる緩流河川であり、直轄管理区間の河床勾配は1/690~1/4,500である。この直轄区間において、平成18年8月及び平成25年7月、9月出水により、表-1に示す地区で漏水が発生している(写真-1, 2)。

表-1 梯川の漏水実績

出水年次	地区名	左右岸	位置	漏水形態	漏水状況
H18.7	川辺	右岸	5.0k付近	堤体漏水	噴砂
H18.7	白江	左岸	6.6k付近	基盤漏水	噴砂
H18.7	金屋	左岸	6.8k付近	堤体漏水	噴砂
H18.7	千代	右岸	7.6k付近	基盤漏水	漏水のみ
H25.7	古府	右岸	8.6k付近	基盤漏水	噴砂、すべり破壊
H25.9	荒木田	左岸	9.5k付近	基盤漏水	漏水のみ



写真-1 白江地区(左岸6.6k付近)の漏水状況(噴砂)⁷⁾



写真-2 荒木田地区(左岸9.5k付近)の漏水状況(漏水のみ)⁹⁾

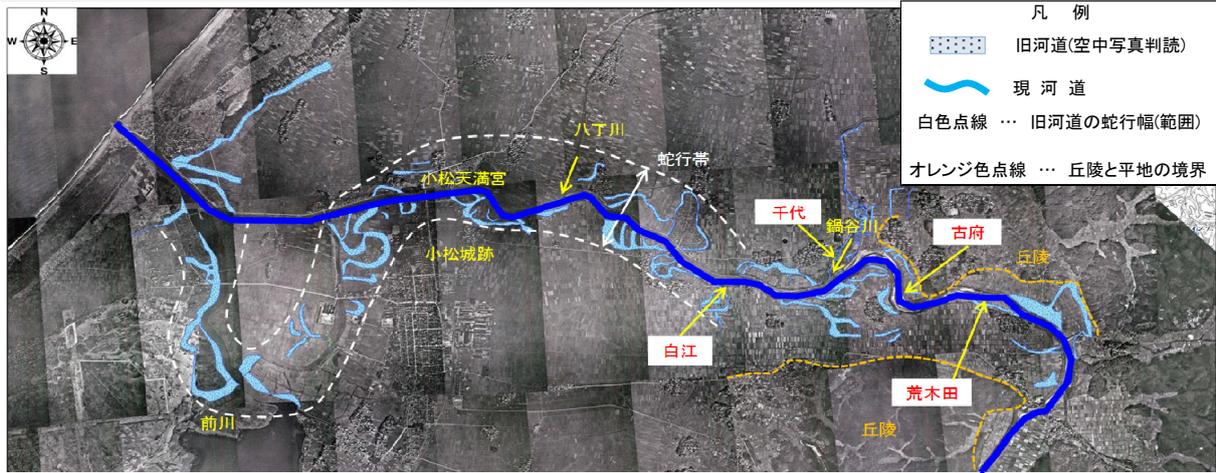


図-1 梯川の米軍撮影の空中写真による旧河道判読図と漏水発生箇所⁸⁾

写真-1の白江地区(左岸6.6k付近)は、堤防裏のり尻付近及び堤内地側の畑部分から噴砂が発生し、月の輪による水防活動が行われている。写真-2の荒木田地区(左岸9.5k付近)は、堤内地側の水田部分で漏水が発生し、拡大写真のように漏水のみで、噴砂は発生していない。図-1には、戦後米軍が撮影した空中写真や明治35年実測平面図(建設省金沢工事事務所)から判読した旧河道分布図を示す。基盤漏水が発生した白江、千代、古府、荒木田地区は、旧河道と堤防の交差付近または堤防と旧河道に囲まれた範囲で発生していることがわかる。

古くから梯川下流域は湿地地帯であり、降雨による氾濫被害が多かった。明治2年から八丁川と鍋谷川間について旧河道の蛇行が大きい箇所について直線化する「川切り」が行われてきた。明治44年(1911年)から大正12年(1923年)にかけて、それまで小松城下流から大きく南側に屈曲していた区間を1.1kmに短縮する改修が行われている。戦後の米軍撮影の空中写真時では、これらの旧河道はほとんどが水田に改変されている。旧河道が示す旧流路は、河床勾配が1/4,500と変化する鍋谷川合流付近から一定の蛇行帯幅をもって流下しており、途中、八丁川と合流しながら小松天満宮付近で大きく南側に屈曲し、前川と合流して日本海へと流れている。鍋谷川合流付近から上流は、蛇行帯幅が小さくなり、周辺の丘陵に規制

を受けながら蛇行している部分が見られる。基盤漏水発生箇所は、河床勾配変化点の鍋谷川合流の上下流付近で発生している。

図-2には、梯川右岸堤防沿いの地質縦断面図を示す。図から、表層地層の分布の特徴は、地形を反映しており、小松天満宮付近で梯川が大きく南側へ屈曲する箇所から下流側では地表面付近から砂質土層が分布する。小松天満宮付近から八丁川合流付近は、土地利用は水田であり、地表面付近に粘性土層が厚く分布する。八丁川合流～鍋谷川合流付近では、梯川の旧河道の蛇行帯幅が大きく、旧河道沿いに自然堤防が発達し、表層地質は、砂質土層が主体に分布する。河床勾配が変化する鍋谷川合流付近から上流では旧河道の振幅が小さくなり、表層地質は砂礫層が分布するようになる。漏水発生箇所は、八丁川合流付近から上流で基盤層に透水性の高い砂礫層が分布するようになる区間である。このように梯川の基礎地盤の地層を上流～下流にかけて全体を通してみると上流側で砂礫層が主体に分布し、下流側に向かって粒径が小さくなって、砂質土層となり、河川堆積環境に応じた地層が遷移的に分布する。

次に基盤漏水の発生要因となる透水層(砂質土層、砂礫層)の透水係数を表層土の土質と層厚を河川縦断方向に整理したものを図-3に示す。透水層の透水係数は、地

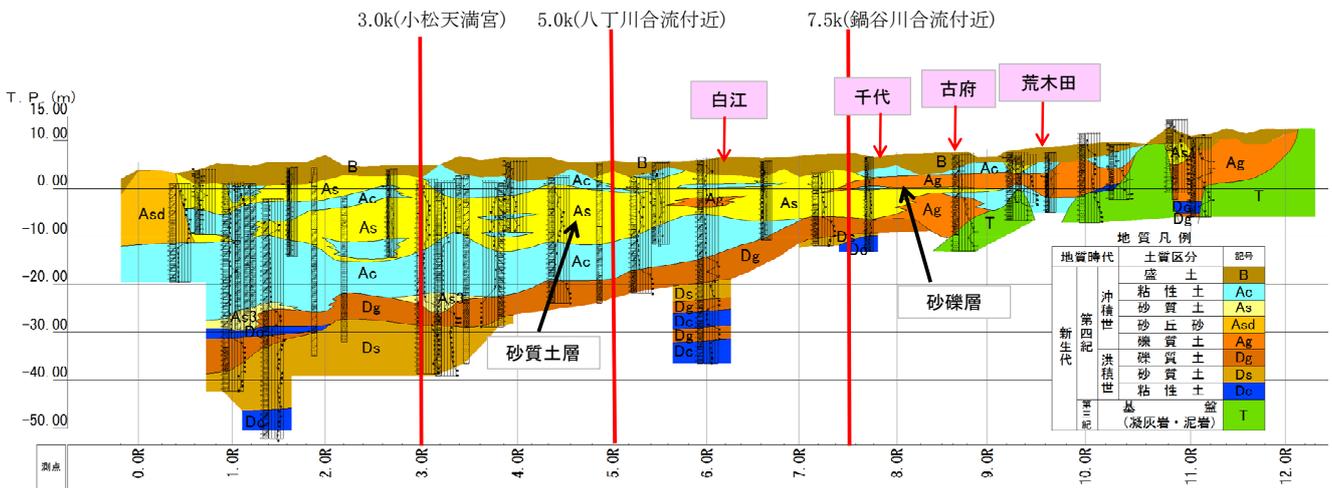


図-2 梯川右岸堤防沿いの地質縦断面図⁹⁾

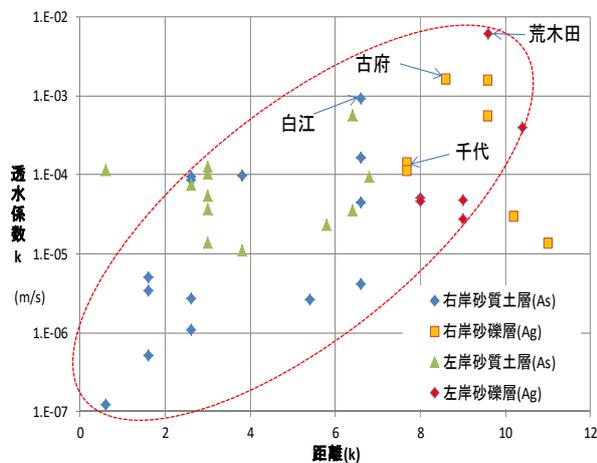


図-3 河川縦断方向の基礎地盤透水層の透水係数

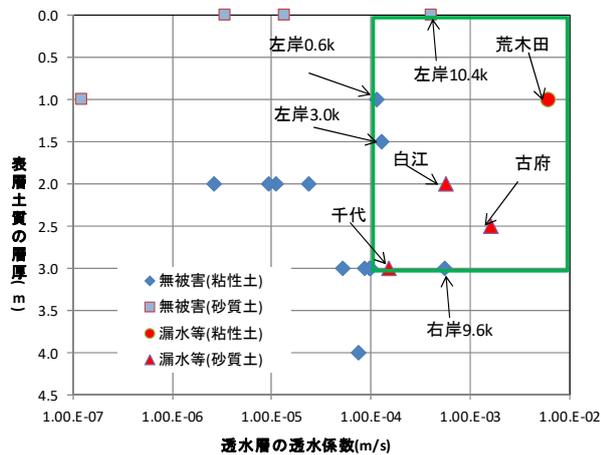


図-5 基礎地盤透水層の透水係数と表層土質の層厚の関係

位置	距離 (k)	層名	土質	層厚 (m)	透水係数	備考
右岸	0.6k	堤体土質	砂	1m	2.61.E-04	
		表層土質	砂			
		透水層	シルト質砂	2m	1.22.E-07	
右岸	1.6k	堤体土質	砂			
		透水層	シルト質砂	3m	3.40.E-06	
		表層土質	粘性土			
右岸	2.6k	堤体土質	砂	3m	-	
		表層土質	粘性土			
		透水層	シルト質砂	-	8.73.E-05	
右岸	3.8k	堤体土質	砂	3m	-	
		表層土質	粘性土			
		透水層	シルト質砂	-	9.92.E-05	
右岸川辺	5.4k	堤体土質	シルト質砂	2m	-	堤体漏水
		表層土質	粘性土			
		透水層	シルト質砂	-	2.60.E-06	
右岸	6.6k	堤体土質	シルト質砂	1m	3.53.E-05	
		表層土質	シルト質砂			
		透水層	砂	-	9.45.E-06	
右岸千代	7.7k	堤体土質	粘性土	3m	3.95.E-05	漏水のみ
		表層土質	シルト質砂			
		透水層	砂礫	-	1.50.E-04	
右岸古府	8.4k	堤体土質	シルト質砂	0.5m	-	噴砂、すべり破壊
		表層土質	粘性土			
		透水層	砂	2m	1.84.E-06	
右岸	9.6k	堤体土質	粘性土	3m	-	
		表層土質	粘性土			
		透水層	砂礫	-	5.57.E-04	
右岸	11.0k	堤体土質	砂礫			
		透水層	砂礫	-	1.34.E-05	

図-4 裏のり尻付近の模式土質構成図(右岸)

質縦断面図の地層を反映して下流側で小さく、上流側に向かって大きくなる傾向がある。図中の赤点線枠の範囲外にあるデータをみると、最下流の透水係数 10^4 m/s を示す地層は粒径均一な砂丘砂の値であり、最上流の透水係数 10^5 m/s は谷底平野に堆積する砂礫層で、マトリックスに細粒分を混入するため透水係数が低くなっている。さらに、堤防詳細点検を実施した地質横断面⁹⁾から、パイピ

ングに直接に関係する右岸側の裏のり尻付近の表層土質の層厚とそれ以深に分布する透水層(図-2)の地質縦断面図の基礎地盤で連続する透水層である砂質土層及び砂礫層)の透水係数を模式的に整理したものを図-4に示す。この模式図をもとに横軸に透水層の透水係数、縦軸に表層土質の層厚をとり図-5に整理した。図より、漏水発生箇所は、表層土質が存在し、層厚が1~3m程度、透水層

の透水係数が 10^{-4} m/s以上であることがわかる。枠の範囲付近にある無被害箇所は、砂丘地や谷底平野にあり、漏水箇所は河床勾配変化点や旧河道などの地形との影響も踏まえた整理が必要と考える。

3. パイピングによる堤防変状の機構

平成25年7月出水で見られた古府地区の漏水発生位置を判読した旧河道とともに図-6に示す。堤内地側に噴砂を伴う基盤漏水により、堤防がすべり破壊に至った8.4k箇所(写真-3)と天端亀裂程度に留まった8.6kの噴砂箇所(写真-4)の状況を土質構成、堤防条件等を表-2, 3に示す。

各断面の堤防高 H 、裏のり面の勾配(のり肩とのり尻を結んだ勾配)、実績水位・降雨の外力⁹⁾を用いて非常常の飽和・不飽和浸透流解析と安定計算(全応力法)によ

表-2 パイピング発生箇所諸元とパイピング状況

検討断面	堤防高 H (m)	のり勾配	パイピング判定	裏のり面すべり破壊	通過円弧の土質	被災形態
			G/W	最小安全率 F_s		
8.2k	3.8	1 : 1.40	3.178	1.469	砂質土層(堤体)	噴砂
8.4k	4.3	1 : 1.17	0.233	1.046	砂質土層(基礎地盤)	噴砂すべり破壊
8.6k	4.0	1 : 1.35	0.438	1.311	砂質土層(堤体)	多量の噴砂

表-3 計算に使用した土質定数

区分	土層記号	土質	飽和単位体積重量(kN/m ³)	湿潤単位体積重量(kN/m ³)	内部摩擦角(度)	粘着力(kN/m ²)	透水係数(m/s)
堤体	Bs1	砂質土	16.8	14.9	9.5	20.7	5.3E-06
	Bs2	砂質土	16.9	16.3	9.9	12.5	2.9E-06
	Bs3	砂質土	20.0	19.0	30.0	1.0	9.1E-06
基礎地盤	Ac1-1	粘性土	17.3	16.7	0.0	29.4	1.0E-07
	As1-1	砂質土	-	17.0	27.2	0.0	1.8E-06
	Ag1-1	礫質土	-	19.0	34.6	0.0	1.6E-03

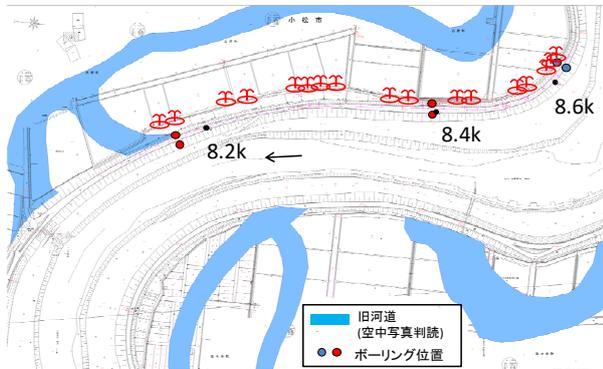


図-6 古府地区の漏水発生位置⁹⁾

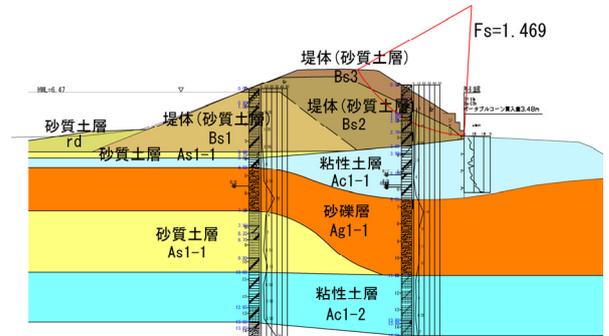


図-7 右岸8.2kの地質断面図⁹⁾



写真-3 右岸8.4k付近のすべり破壊発生箇所⁹⁾

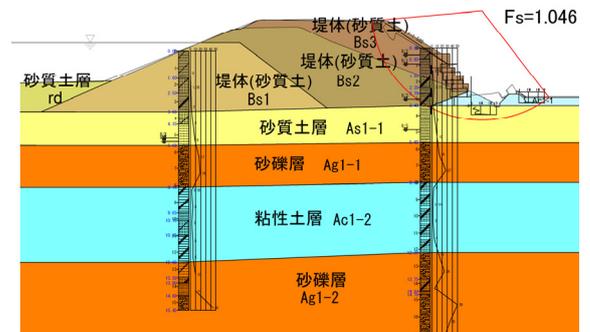


図-8 右岸8.4kの地質断面図⁹⁾



写真-4 右岸8.6k付近の噴砂状況⁹⁾

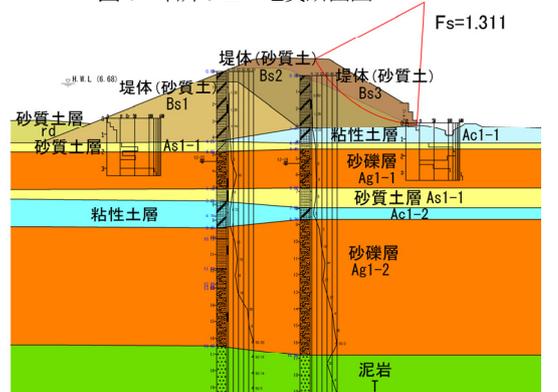


図-9 右岸8.6kの地質断面図⁹⁾

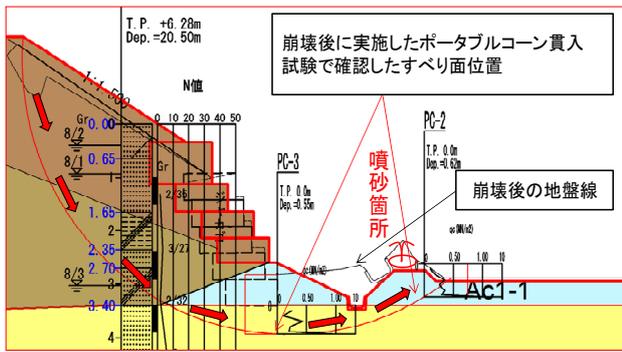


図-10 右岸8.4kのポータブルコーン試験結果⁹⁾

てパイピング判定値 G/W 、裏のり面のすべり安全率 $F_s^{10)}$ と被災形態をまとめて示している。

右岸8.2k地点は、旧河道との交差付近にあり、旧河道を反映した地層分布で裏のり尻付近の粘性土層の層厚が3.5mと厚く分布する。裏のり尻付近のパイピング判定値 G/W は3.178と1以上を示し、のり尻部で漏水は発生していない。堤内地側の水田部分で粘性土層の層厚が薄くなり、漏水に伴う噴砂が発生したと思われる。円弧すべり計算の最小安全率は、 $F_s=1.469$ となり、他の断面に比べ安全率が大きく、堤防変状は発生していない(図-7)。

右岸8.4k地点は、水田の畔部分で噴砂があり、内水の低下とともに発生したものと考えられる。表層の粘性土層の層厚が0.5m程度と薄く、パイピング判定値 G/W は0.233と大きく1を下回る。粘性土層下位に分布する砂質土層の層厚は2m程度と厚く、最小安全率の円弧はこの砂質土層を通過する。最小安全率は、 $F_s=1.046$ と1以上であり、すべり破壊が発生しない結果となる(図-8)。

右岸8.4k地点の堤防の変状をみると、のり尻付近の堤脚水路が水平方向及び鉛直上方に移動しており、基礎地盤の土質を含む移動があったものと考えられる。崩壊箇所の上流の堤脚水路に水が溜まっていることから、内水位が水路付近に低下した時点で崩壊が発生していると考えられる(噴砂は畔で発生しており、噴砂後にすべり破壊が発生)。崩壊後に実施したポータブルコーン貫入試験結果(図-10)から、基礎地盤の砂質土層に低強度部分があり、円弧すべり計算結果とほぼ同形状の位置にあることから、水圧上昇による有効応力の低下に伴うすべり破壊の発生が考えられるが、フトンカゴ部分が大きく沈下していることから、上野ら⁵⁾、笹岡ら⁹⁾の模型実験のようにパイピングによる土粒子の移動に伴う空洞発生後の沈下による変状が発生したことも考えられる。

すべり破壊発生箇所は、他の断面と比較して、堤防高が高く、のり面勾配が急勾配である。このため、円弧すべり安全率が他の断面に比べ相対的に低くなっており、1に近い値を示す。

右岸8.6k地点は、のり尻付近の堤脚水路に多量の噴砂が発生したが、堤防すべり破壊まで至らなかった。表層

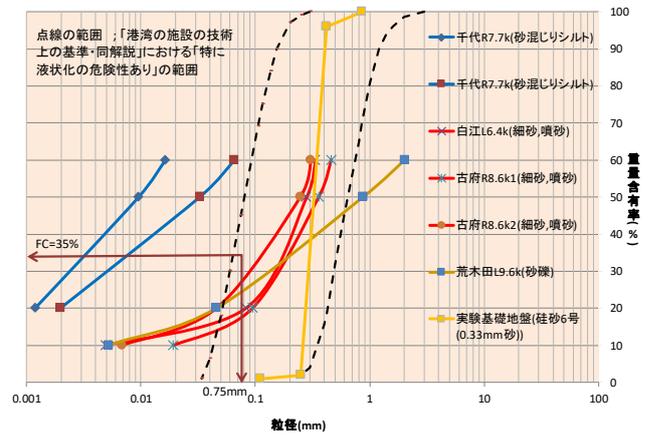


図-11 噴砂発生箇所の粒徑加積曲線

の粘性土層の層厚が1.0m程度と薄く、パイピング判定値 G/W は0.438と8.4k地点と比較して大きく、パイピング判定値 G/W と噴砂発生との関係はみられない。円弧すべり計算の最小安全率は1.311と大きく、円弧は堤体を通る形状である(図-9)。地表部分には、砂粒子が噴出しており、礫は噴出していないことから、砂礫層上位の砂質土層で土粒子移動が発生しているものと考えられる。この砂質土層にパイピング破壊が発生して強度低下が発生した場合(せん断抵抗角 $\phi=0$ として計算した場合)でも $F_s=1.149$ と1以上となりすべり破壊は発生しない結果となった。

次に噴砂が発生する砂層(土粒子の移動が発生する砂層)の粒度組成を図-11に示す。粒度組成は、「河川堤防の土質試験結果情報」¹¹⁾の土質試験データを用いている。地盤工学会の均等係数は D_{60}/D_{10} であるが、 D_{10} は細粒分含有率が多い土質では求められない場合が多いため、ここでは均等係数を D_{60}/D_{20} として整理した。

白江地区の噴砂の粒度組成は、表層に分布する砂質土層が噴出しており(写真-1)、均等係数が10以下、細粒分含有率が35%以下の範囲にある(道路橋示方書の液状判定の目安値¹²⁾)。千代地区は、漏水発生のみで表層土質は砂混じりシルトであり、細粒分含有率は50%以上である。古府地区の噴砂(写真-3,4)は、白江地区と同様の砂質土である。荒木田地区の表層土質は粘性土であることから、噴砂が発生しておらず、漏水のみの現象である(写真-2)。透水層が砂礫層の粒徑加積曲線を同図に示す。噴砂の粒徑加積曲線に比べ右側に位置し、均等係数は44と大きく緩い勾配の曲線となっている。

図中の点線の範囲は、「港湾施設の技術上の基準・同解説」で示されている「特に液状化の危険性あり」の粒度範囲にあり、パイピングによる噴砂を生じやすい土質は、液状化しやすい砂粒子と同範囲にあることがわかる。

また、図-11には上野ら⁵⁾が模型実験で使用した土質の粒徑加積曲線を合わせて示した。基礎地盤の上層に使用した粒砂6号(0.33mm砂)は、梯川の噴砂の粒度特性と同

様の範囲にある。模型実験では上下層を砂層としたケースで、堤体土質のベントナイト混合土(透水係数 $k=4.1 \times 10^9 \text{m/s}$ の不透水材料)も土砂流出し、急激な沈下発生による決壊状態に至ったと報告されている。このように堤体土質が不透水性材料でもパイピングを発生させる砂層と接している場合には粒度組成によっては堤体との境界で内部侵食のような土粒子移動が起こり、堤防の沈下変状が発生することが確認されている。古府地区の堤体土質は実験材料よりも細粒分が多く、異なる粒度組成である。古府地区で発生したすべり破壊は、基礎地盤の砂質土の噴砂による有効応力の低下によって、堤防荷重とのバランスを失い円弧すべりに近い変状が発生したものとと思われる。

4. まとめ

洪水時の梯川堤防の漏水事例をもとに基礎漏水発生箇所と地形・地質の関係を検討した結果を以下にまとめる。

- ・基礎漏水発生箇所は、空中写真判読から抽出した旧河道の形状から、氾濫原でみられる蛇行河道と扇状地や谷底平野でみられる網状流路の境界付近で発生していることを確認した。
- ・河川堤防沿いの地質縦断面図の整理から、基礎地盤の上流～下流にかけて連続して分布する砂質土層または砂礫層の透水係数が大きい区間で漏水が発生し(梯川では透水係数 $k=10^4 \text{m/s}$ 以上)、表層地層の層厚が1～3m程度で漏水が発生することを確認した。
- ・噴砂発生土質は、液状化の発生しやすい粒度組成の範囲にあり、この範囲外の土質では漏水のみの現象であることを確認した。
- ・梯川8.4kの堤体変状は、堤体土質の粒度特性が噴砂の発生しない範囲にあることから、基礎地盤の砂

質土の土粒子の移動に伴うせん断抵抗力の低下による円弧すべり破壊が発生したものと考えられる。

参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告，pp.3-4，2013.
- 2) 田端幸輔，福岡捷二，内堀寿美男，上野勇太：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，河川技術論文集 第23巻，pp.387-392，2017.
- 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：基礎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) 国土交通省北陸地方整備局 金沢河川国道事務所：手取川・梯川堤防詳細調査業務委託報告書，2007.
- 8) 国土交通省北陸地方整備局 金沢河川国道事務所：平成19年度手取川・梯川堤防詳細調査業務報告書，2008.
- 9) 国土交通省北陸地方整備局 金沢河川国道事務所：平成25年度梯川堤防浸透対策検討業務報告書，2014.
- 10) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，2012.
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究室：河川堤防の土質試験結果情報
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp.134，2012.

(2017.9.29 受付)

TOPOGRAPHIC AND GEOLOGICAL FEATURES CAUSING THE WATER LEAKAGE AT FOUNDATION GROUND AND LEVEE BODY DEFORMATIONS BY THE PIPING IN THE KAKEHASHI RIVER

Yutaka SATO, Takashi OHBUCHI, and Shoji FUKUOKA

The goal of the present study aims at estimating locations and mechanism of levee collapse by the piping of the levee foundations. Firstly, topographic and geological features are investigated on the basis of the seepage in the Kakehashi River.

It was demonstrated quantitatively from field investigations that seepage conditions are determined by the quality and thickness of surface soil and permeability coefficient of permeable layers and that the levee deformation by the foundation piping is mainly controlled by grain size distribution, thickness and distribution depth of permeable layers and embankment load.