

## 旧河道の地下水分布と堤防周辺の基盤漏水発生箇所との関係

河川堤防, 基盤漏水, 旧河道, 水圧分布, 準二次元浸透流解析法

キタック 正会員 佐藤 豊  
大淵 貴  
中央大学 フェロー 福岡捷二

### 1. はじめに

筆者ら<sup>1)</sup>は、基盤漏水発生箇所は旧河道との交差付近で多く発生していることから、堤防裏のり尻付近の旧河道分布と土質縦断面図を整理し、漏水発生位置と漏水形態を調べることで、これらの関係を説明できる可能性を示した。さらに、旧河道と周辺氾濫原の土質構成及び透水性との相違を示してきた。

本研究では、さらに具体的に旧河道部分での地下水分布、土質特性を把握し、基盤漏水発生箇所との関係を準二次元浸透流解析法<sup>2)</sup>で定量化し、解析法の有効性を示している。

### 2. 検討方法

筆者ら<sup>3)</sup>は、千曲川の飯田地区の地下水位観測データから、旧河道部分で地下水位が高くなることを示した(図-1)。ここでは、信濃川など他の河川の地下水位観測結果から地下水コンター図と地形分類図とを重ね旧河道部分の地下水分布の特性を把握し、飯田地区と同様の機構がみられるのかを確認する。次に断面二次元飽和-不飽和浸透流(FEM)解析を用いて、堤内地側に存在する旧河道の位置、土質と水圧分布の関係を把握する。これらの結果をもとに田端・福岡<sup>2)</sup>が示す準二次元浸透流解析を用いて、千曲川と梯川の堤防漏水発生箇所について、準二次元浸透流解析法の適用性を検討する。



図-1 千曲川飯田地区の地下水コンター図

### 3. 堤内地の地下水位観測データから見た本川と旧河道の関係

図-2, 図-3には、信濃川流域で観測された旧河道部分の地下水位分布を地形分類と重ね整理している。地下水は、旧河道から氾濫原側に向かう流れとなっている。旧河道は、信濃川本川とつながっているため、図-4の地下水位変動は信濃川河川水位と連動していることがわかる。

図-5, 図-6の五十嵐川流域の地下水分布は、山地から抜け出て形成された扇状地で、周囲の丘陵から地下水涵養を受けながら流れている。渡瀬橋付近の左岸氾濫原には、表層に粘性土、砂質土が分布し、扇状地の砂礫に比べ透水性が小さいことから、渡瀬橋左岸付近では水圧が高まり地下水の尾根が形成されている(図-6)。これに対し右岸側は扇状地が広く分布することから地下水の尾根は形成されていない。

渡瀬橋上流左岸付近では過去の出水で何回か漏水が発生しており、川表側に遮水矢板が施工されている。平成23年の出水では、渡瀬橋左岸上流で漏水が発生した。地



図-2 信濃川前須田地区の地形分類図

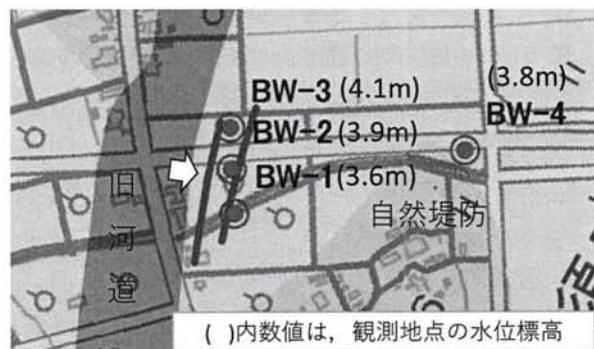


図-3 信濃川前須田地区の地下水分布図



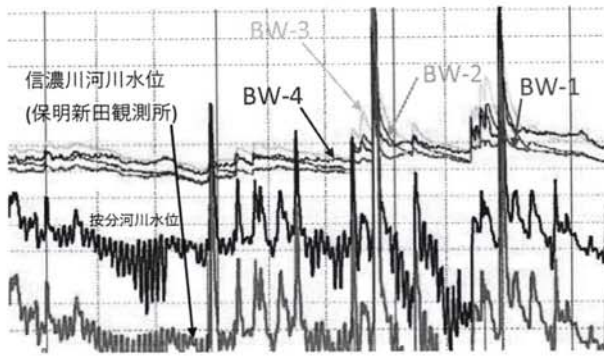


図-4 信濃川前須田地区の地下水位変動図

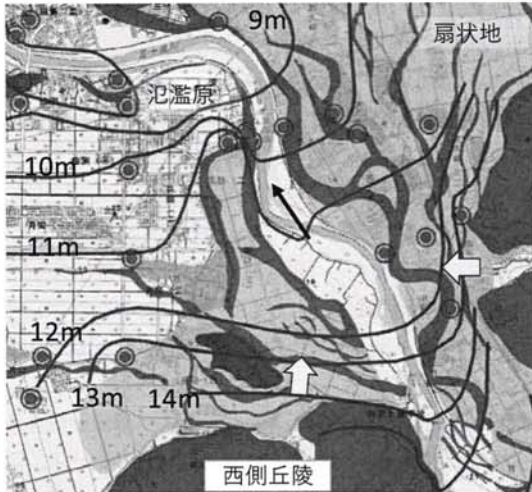


図-5 五十嵐川の地下水分布図



図-6 五十嵐川のH23漏水発生箇所と地下水分布図



図-7 刈谷田川の地下水分布図と土地条件図

元住民からのヒアリングでは透明で冷たい水が浸出したとのことであり、渡瀬橋左岸上流側の堤内地側の地下水尾根の部分が旧河道を通じて浸出したものと考えられる。

図-7の刈谷田川は氾濫原を流れる河川で、地下水分布より、周辺からの地下水涵養を受けていることがわかる。最下流の旧河道付近のNo. 8, 9, 10では旧河道に位置するNo. 10がやや高い水位を示しており、旧河道の水位の影響を受けていると考えられる。

以上の整理から、旧河道が本川に近い場合には、旧河道の地下水位は河川水位の影響を受けており、本川から旧河道へ地下水が繋がっており、さらに周辺の氾濫原低地部へと流れている。五十嵐川扇状地では、周辺丘陵からの地下水の涵養を受けて流れており、透水性の異なる氾濫原との境界付近では高い地下水位を形成し、旧河道を通じ、本川へ伏流する流れもある。

#### 4. 千曲川穂高地区の旧河道と氾濫原の地下水圧分布

地下水位観測データから、旧河道では水圧が高くなることを確認した。ここでは、断面二次元飽和-不飽和浸透流(FEM)解析で堤内地側に分布する旧河道の位置による水圧分布を比較検討した。解析対象は、図-8に示す旧河道と氾濫原の土質構成が把握されている千曲川の穂高地区<sup>1)</sup>の裏のり尻付近である。ケース1は、旧河道1沿いで表層全体に粘性土(シルト質粘土)が分布する土質構成でモデル化した。ケース2は、氾濫原の表層全体に砂質土(細砂)が分布する土質構成とし、ケース3は、旧河道2が堤内地

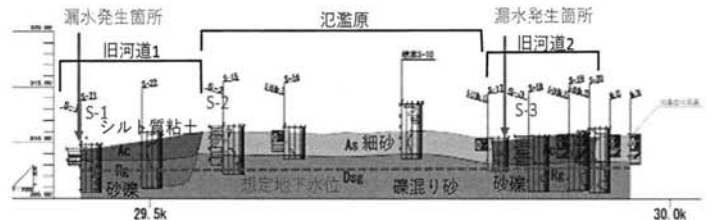
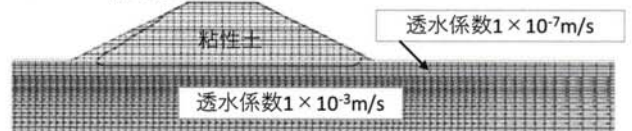
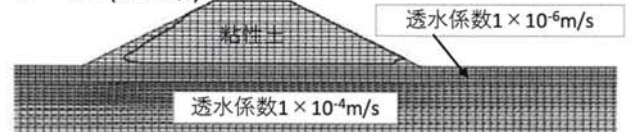


図-8 千曲川穂高地区の堤防裏のり尻付近の土質縦断面図<sup>1)</sup>

ケース1(旧河道)



ケース2(氾濫原)



ケース3



図-9 FEM解析モデル図



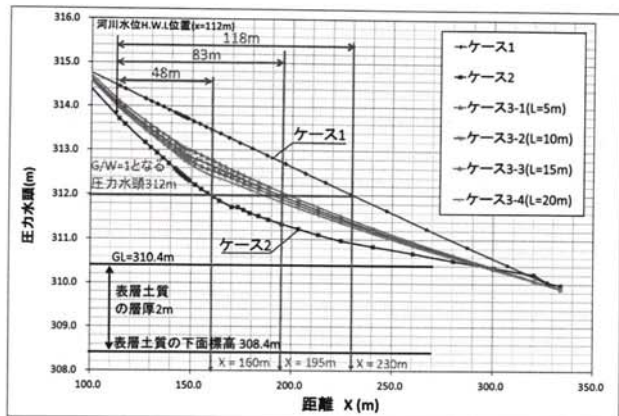


図-10 千曲川穂高地区の堤内地側の水圧分布図

側の堤防裏のり尻から5m, 10m, 15m, 20mに位置し, 旧河道に粘性土が分布するモデルとした(図-9)。

図-10に示すように, ケース1の表層が粘性土で覆われた場合が最も高い水圧分布となり, ケース2の表層に砂質土が分布する氾濫原では最も低い水圧分布となる。表層土質を層厚2mとすると図-10に示すように, 盤ぶくれの破壊安全率基準 $G/W=1$ 以上となる圧力水頭を求めると312mとなる(表層土質の密度 $1.8g/m^3$ とした場合)。これより, 河川水位からの盤ぶくれ範囲を求めると, ケース1で約118m, ケース2で約48m, ケース3では約83mとなる。このことは, 既往研究<sup>3)</sup>で明らかにした千曲川山王島地区の基盤漏水が, 河川水位から約95m離れた旧河道部分で発生していることと対応している(図-11)。穂高地区では, 水圧分布が最も高くなる堤防裏のり尻付近で漏水が発生したが, 山王島地区の堤防は上信越自動車の盛土と一体化した大きな断面形状であり, 自動車の盛土が薄くなる部分で漏水が発生している。以上のことから, 裏のり尻付近の土質を旧河道と氾濫原でモデル化し, 水平方向に連続した地層モデルで計算する準二次元浸透流解析法で基盤漏水の危険箇所を抽出できるものと考えられる。

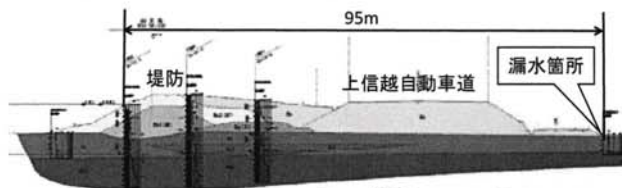


図-11 千曲川山王島地区の漏水箇所の地質断面図

## 5. 準二次元浸透流解析法による基盤漏水箇所の検討

ここでは, 田端・福岡<sup>2)</sup>による準二次元浸透流解析法を用いて, 盤ぶくれの破壊安全率基準 $G/W$ を求め, 千曲川堤防の穂高地区と梯川の古府地区<sup>4)</sup>の基盤漏水の発生について検証した。

図-4に示す地下水位変動から河川水位と地下水位が連動しており, 基盤浸透は河川水位上昇の影響を受けている。複合土層の透水係数 $k_d$ は流れが土層に平行として式(1)を用い, 高水敷の透水係数は $k_a=k_d$ として用いる。基盤

$$k_d = \frac{k_0 \cdot d_0 + k_1 \cdot D_1 + k_2 \cdot D_2 + \dots + k_n \cdot D_n}{d_0 + D_1 + D_2 + \dots + D_n} \quad (1)$$

$$\Psi(x, t) = \Psi_b(t) - \frac{\Psi_b(t) - \Psi_0}{\zeta(t)} x \quad (2)$$

$$\zeta(t) = \sqrt{(\Psi_b(t) - \Psi_0) \frac{2k_d \cdot D(d_0 + D) + k_a \cdot B_f^2}{\lambda D(d_0 + D)} t} \quad (3)$$

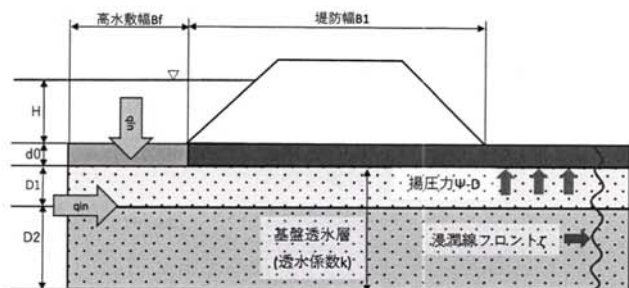


図-12 準二次元浸透線解析モデル

透水層内の圧力水頭 $\Psi$ , 浸潤線フロント位置 $z$ は, 基盤透水層内で, 行き止まりがない条件の式(2), (3)で求める。

4章で示したように千曲川堤防の穂高地区では, 堤防裏のり尻付近の土質縦断面図から旧河道と氾濫原の土質の違いにより, 透水性に差異が生じ, 旧河道部分で基盤漏水が発生している。

旧河道の漏水発生箇所と氾濫原の非発生箇所とで盤ぶくれの破壊安全率基準 $G/W$ を求め表-1に示す。旧河道箇所では, 裏のり尻付近で盤ぶくれ破壊安全率基準が0.37と1を下回る結果となり, 漏水発生に対応する。氾濫原では, 盤ぶくれ破壊安全率基準が1.32となり, 非発生に対応する。穂高地区では, 図-13に示したように基礎地盤の砂礫層(Dsg)下に礫層(Dg)が連続して厚く分布している。計算上はDg層の層厚が35m以上あると $G/W$ が1よりも大きくなり, 漏水が発生しない結果となる。対岸の地質データを含め, 土質を精査するとDsg層とDg層の間に粘性土層が分布しており, 解析の基盤透水層の対象層をDsg層までとすると漏水発生条件となる。したがって, 深度方向の透水層厚さの設定が重要となる。

次に, 梯川の古府地区8.4kの漏水発生箇所, すべり破壊発生箇所と8.2kの非発生箇所を対象に解析すると, 8.2kの複合土層の透水係数 $k_d$ は8.4kの複合土層の透水係数 $k_d$ より大きい, 表層の粘性土層が3m以上と厚いため,  $G/W=3.13$ と漏水が発生しない結果となった。これは, 既往研究<sup>4)</sup>の基礎地盤透水層の透水係数と表層土層の層厚の関係図で漏水が発生しない範囲に分布しており, 計算値と一致している。古府地区の8.4kの漏水発生箇所は, 旧河道に囲まれた氾濫原で, 図-8の千曲川の土質構成とは異なり, 表層に粘性土が分布することで, 高い水圧となり漏水が発生している。

次に, 図-1に示した飯田地区における旧河道と氾濫原の水圧分布の相違を検討した。図-14, 15に氾濫原と旧河



表-1 準二次元浸透流解析結果

地区	解析区分	地層名	土質名	厚層 (m)	透水係数(m/s)		Q/W	備考	
					単層	複合 $k_d$			
千曲川 穂高地区	旧河道	Ac	粘性土	1.2	8.4E-09	4.1E-04	0.37	漏水発生箇所	
		Rg	砂礫	2.5	1.6E-03				
		Dsg	礫混り砂	8	9.2E-05				
		合計	11.7						
	旧河道 (参考)	Ac	粘性土	1.2	8.4E-09	2.6E-04	1.03		漏水発生箇所
		Rg	砂礫	2.5	1.6E-03				
Dsg		礫混り砂	35	9.2E-05					
	合計	38.7							
氾濫原	As	粘性土	2	3.2E-06	8.0E-05	1.33	漏水無し		
	Dsg	礫混り砂	13	9.2E-05					
		合計	15						
梯川 古府地区	8.4k	Ac1-1	粘性土	0.5	1.0E-07	7.8E-04		0.41	漏水、すべり発生箇所
		As1-1	砂	2.2	3.6E-05				
		Ag1-1	砂礫	2.5	1.6E-03				
			合計	5.2					
	8.2k	Ac1-1	粘性土	3.5	1.0E-07	9.0E-04	3.13	漏水無し	
		Ag1-1	砂礫	4.5	1.6E-03				
	合計	8							

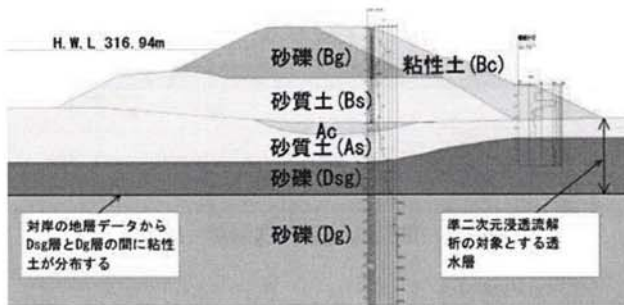


図-13 穂高地区(氾濫原)の地質断面図

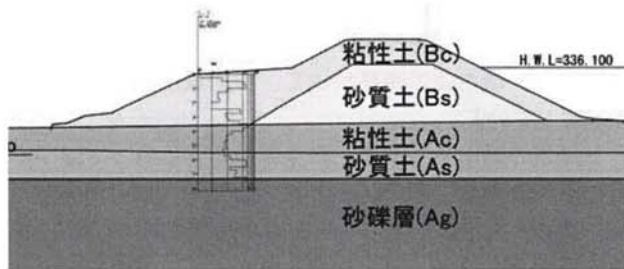


図-14 千曲川飯田地区No. 24付近(氾濫原)の地質断面図

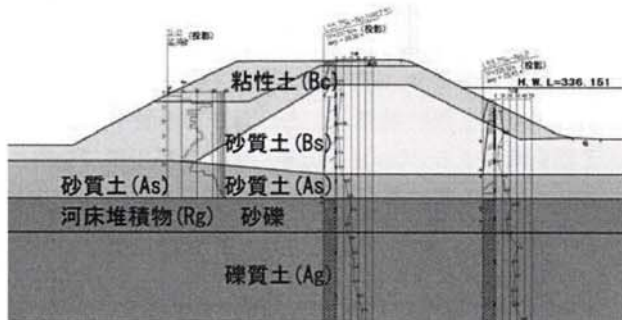


図-15 千曲川飯田地区No. 48付近(旧河道)の地質断面図

表-2 千曲川飯田地区No. 48付近の土質試験結果

地層名	土質	細粒含有率FC(%)	20%粒径 (mm)	透水係数 k(m/s)
As層	細砂	24.7	0.057	4.9E-06
Rg層	砂礫	4.8	0.43	5.1E-04
Ag層	砂礫	8.1	0.37	4.2E-04

透水係数は、20%粒径からクレーガーの近似式で求めた値

道の地質断面図を示し、表-2には、各地層の土質試験結果を示した。図-15の旧河道部分の砂礫上面部分は、旧河

床堆積物(Rg)と推定される、以深の砂礫層(Ag)層に比べ細粒含有率が少なく、20%粒径も大きいことから、透水係数が大きい。このことは、既往研究<sup>1)</sup>の穂高地区でも同様の粒度組成を確認している。これをもとに氾濫原の複合土層の透水係数 $k_d$ は式(1)より $3.3 \times 10^{-4}$ m/sで旧河道の $k_d$ は $3.6 \times 10^{-4}$ m/sとわずかであるが大きい値を示し、旧河道部分で水圧分布が高くなっている。

## 6. まとめ

- ・信濃川流域の地下水位観測データから、本川に近い旧河道の地下水位は河川水位の影響を受け、地下水は本川から旧河道へ流れ、周辺の氾濫原に広がっている。
- ・五十嵐川のような扇状地では、周辺丘陵からの地下水の涵養を受け、透水性が異なる氾濫原との境界付近で高い地下水位を形成し、旧河道を通じ本川へ伏流している。
- ・断面二次元飽和-不飽和浸透流(FEM)解析結果から、旧河道のように表層に粘性土層が分布する箇所では河川水位上昇により高い水圧分布が形成され、漏水が発生しやすい状況となる。
- ・田端・福岡の準二次元浸透流解析法<sup>2)</sup>は、基礎地盤の表層の土質構成及び透水係数の影響を考慮できるため、堤防裏法尻付近の土質縦断面図を整理することで基盤漏水を判定することが可能である。解析は、地形ごとに土質構成及び透水係数が異なるため地形分類で透水層をモデル化する。解析において重要なポイントは、旧河道の場合は、旧河道直下に分布する河床堆積物の透水係数の把握にあり、氾濫原では表層の粘性土の分布の有無が重要である。

## 謝辞

本稿作成にあたり、国土交通省北陸地方整備局および千曲川河川事務所、新潟県土木部のご協力を賜りました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 佐藤豊, 河原武志, 大淵貴, 福岡捷二: 千曲川堤防における基盤漏水・噴砂発生箇所の土質・地下水位と旧河道特性の関係, 河川技術論文集, 第24巻, pp. 571-576, 2018.
- 2) 田端幸輔, 福岡捷二: 堤防基礎地盤のパイピング発生箇所に対する準二次元非定常浸透流解析の適用, 第4回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp. 5-8, 2016.
- 3) 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.
- 4) 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, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 74, No. 4, 2018.

(2018. 11. 5受付)