

3.3 破堤要因

平成16年7月福井豪雨において発生した木田地区春日1丁目地先における破堤に着目し、洪水後の現地調査（情報に基づく破堤状況の整理）と各種解析を実施した。

破堤箇所は、足羽川4.6kmと4.8kmの間であったことと、堤防そのものが流出したことで、破堤直前の堤防高さ、堤体土質などの特性を明確にすることはできない。したがって、調査検討対象区間の設定にあたっては破堤部を含む左岸越水区間（4.0km付近～5.0km付近）を対象とした。

破堤要因に対する検討は、この越水区間における地盤調査結果を用い、河川堤防の破壊要因として考えられる越水による侵食（流水、雨水などの作用で地盤の表面が削り取られること）・洗掘（土砂が水流により洗い流され掘られること）、降雨・洪水（河道内水位）・越水による堤体内浸透に着目し、調査・検討を実施した。図-3.3.1に破堤要因に対する検討フロー図を示す。

なお、検討フロー図に示していない河道内流水による侵食は、本豪雨において被災が生じていないことと、水理検討（平面二次元非定常解析）における川表近傍の流速は2.0m/sec以下となる結果を得ていることから、この侵食破壊の可能性は低いと判断した。

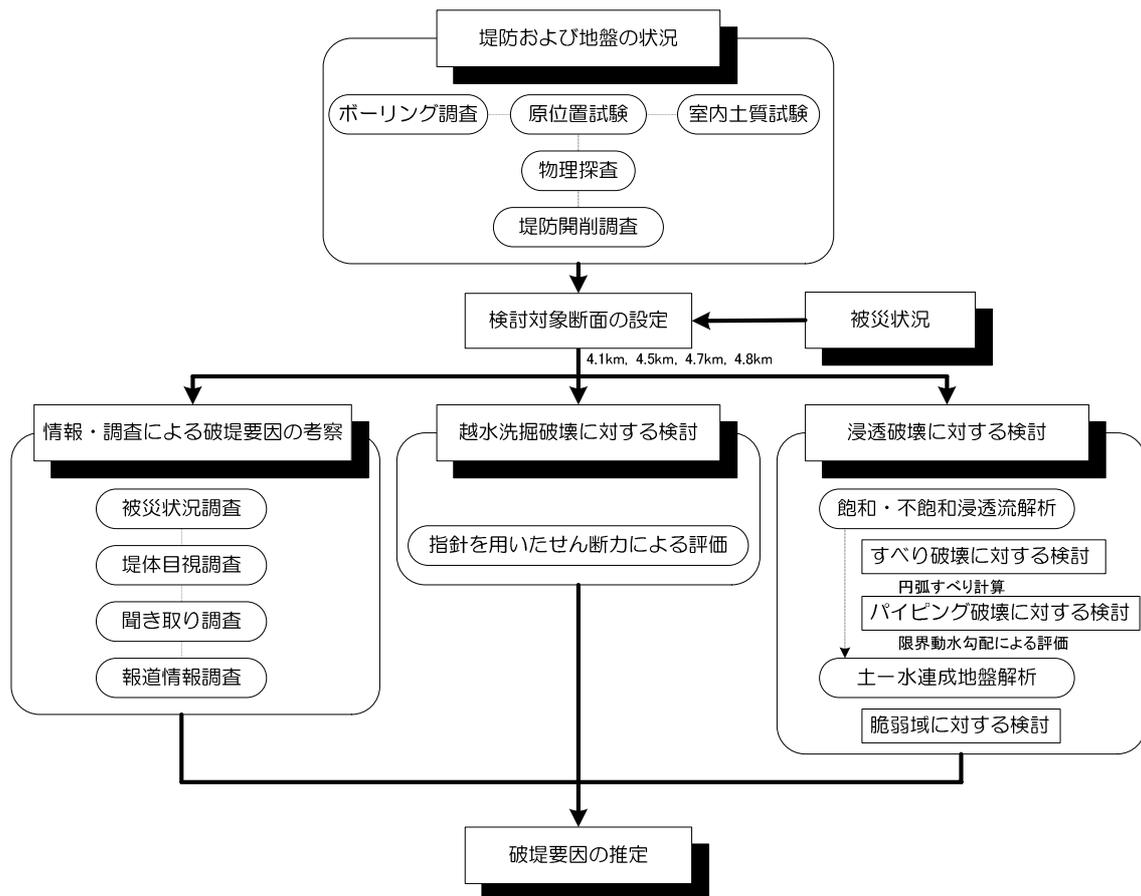


図-3.3.1 破堤要因に対する検討フロー図

3.3.1 堤防および地盤の状況

堤防構造、豪雨後の堤防状況を現地調査した結果を図-3.3.2 に整理した。この図中の被度は、「平成9年版河川水辺の国勢調査マニュアル河川版」(財)リバーフロント整備センター発行 pp.199 の構成種および被度・群度の調査方法に基づいている。また、図中に示したゾーニングは地盤調査結果から堤体地盤特性に着目して大別したものである。ボーリング調査は、堤外、堤体、堤内で実施した。

なお、地盤調査結果の概要として図-3.3.4 に想定地層縦断図、浸透破壊に対する検討を実施した想定地層横断図、本復旧前堤防開削調査図を示す。

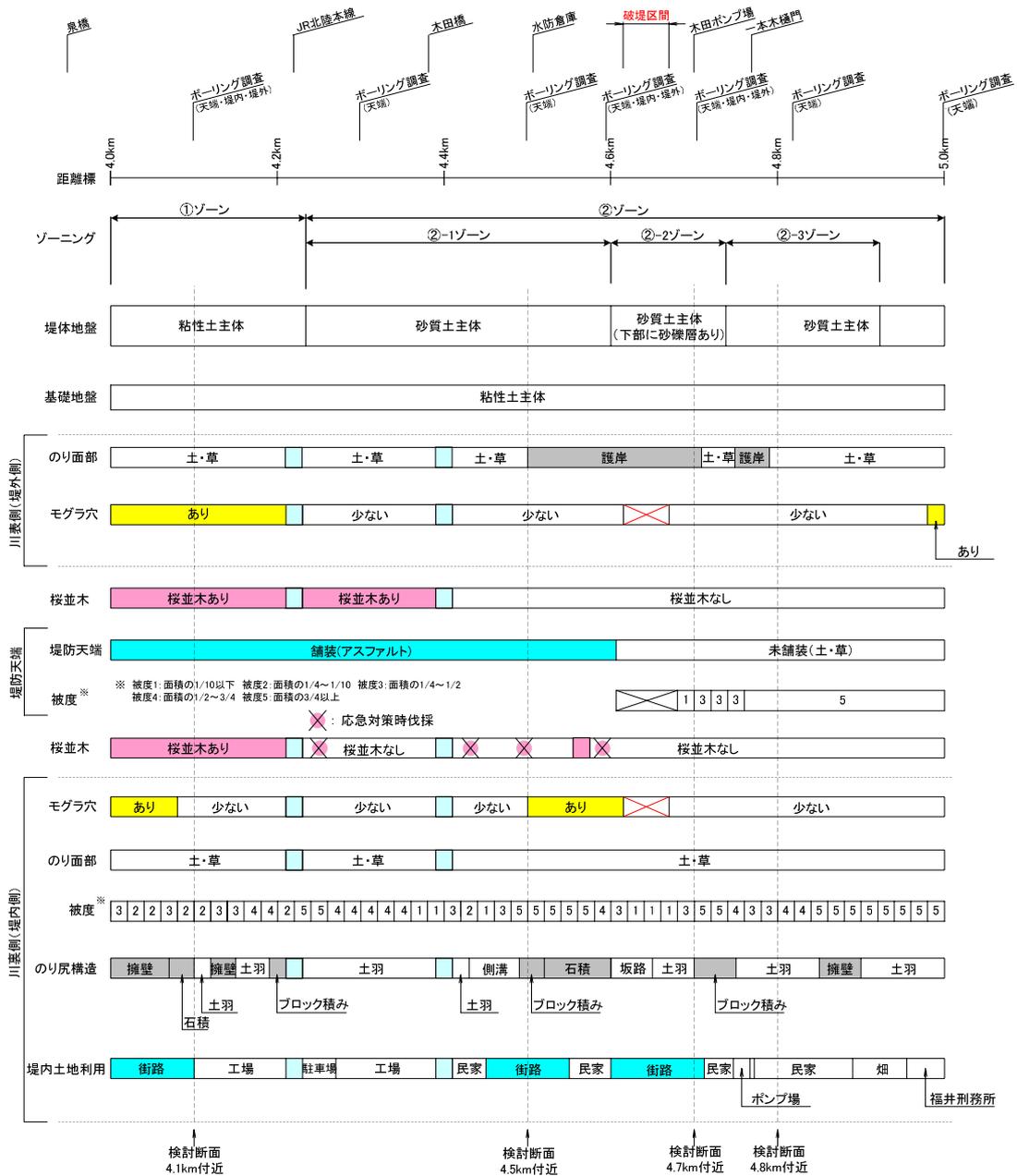


図-3.3.2 堤防特性 (足羽川左岸：4.0km 付近～5.0km 付近)

この調査結果の特徴を次に示す。

堤防構造

- ・ 堤防天端は、破堤箇所の下流 4.6km 付近までアスファルト舗装が施されているが、この上流は未舗装で土・草となっている。
- ・ 川表側護岸は、4.6km の上下流付近でコンクリート張り法枠工がある。
- ・ 川裏側のり尻は、擁壁、石積み、土羽などがあり各所で異なる。
- ・ 破堤箇所付近の堤内地側には坂路が設置されている。

堤防状況

- ・ 豪雨後の目視調査で川表裏とものにり面にモグラ穴の点在を確認した。
- ・ 4.4km 付近から下流には堤防天端付近に桜の木がある。なお、図中に本豪雨における応急対策のため伐採した桜の木も記載している。
- ・ 破堤箇所付近での河川距離標における豪雨後に調査した堤防高を図-3.3.3 に示す。破堤箇所における左右岸の差は天端舗装の有無、下流部との差は橋梁構造物によるもので若干高低差はあるものの計画堤防高を満足している。

堤防管理状況

- ・ 各河川において、流下能力が不足している区間や堤防断面が不足している区間、過去に漏水している箇所などを重要水防区域として設定し、必要に応じ見直しを行っている。
- ・ 重要水防区域については、月 1 回程度巡視を行っており、その他の区域についても、年 2 回程度巡視を実施している。

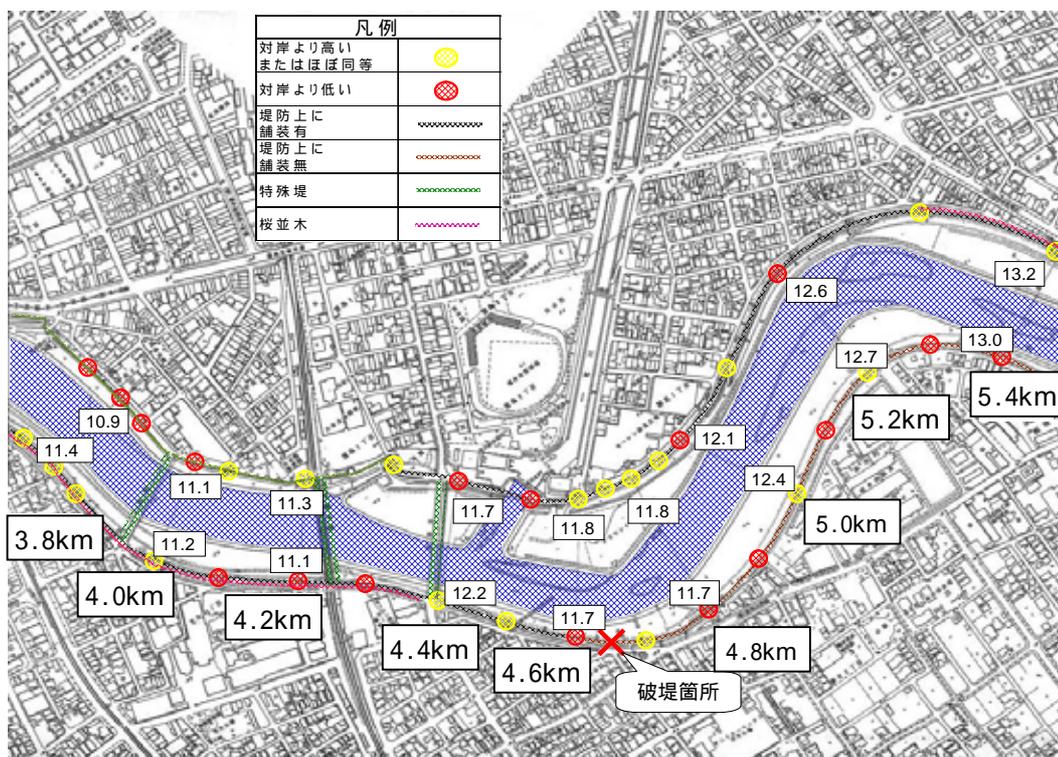


図-3.3.3 破堤箇所付近の堤防高さ(福井豪雨後調査)

河川堤防の浸透に対する安全性の概略評価で指標となる要注意地形は、「旧河道」、「落堀・旧落堀」である。越水区間（足羽川左岸 4.0km 付近～5.0km 付近）における地形・地質は治水地形分類図より、主に三角州となっていることから、この概略評価の要注意地形ではない。

本調査検討委員会では、この区間における地盤の堆積状況の把握を目的として、この区間の下流部 4.1km 地点、上流部破堤箇所近傍の 4.7km 地点において堤防横断方向に複数のボーリング調査を実施した。さらに、堤防天端付近、破堤箇所において数カ所ボーリング調査を行った。

あわせて、これらボーリング調査結果から得られた地盤情報を基礎資料として、物理探査（高密度電気探査、弾性波探査）を実施し、区間全体の地盤を想定した。

想定地層図を図-3.3.4 に示す。この越水区間の地層特性を次に示す。

堤体土質

- ・ 堤体土質は 4.0km～4.2km 付近間は粘性土主体、4.4km～5.0km 付近間は砂質土主体である。
- ・ 堤体直下の基礎地盤は概ね沖積粘性土層（Ac1）であるが、5.0km 付近は沖積砂礫層（Ag1）が分布する。破堤箇所付近の川表には旧河床礫と思われる礫層が分布する。

浸透破壊に対する検討対象断面

これら堤防構造、堤防状況、堤体土質の特性から次に示す 4 断面を対象として、後述する破堤要因の推定における浸透破壊に対する検討を実施した。ゾーンは堤体地盤が粘性土主体であり、ゾーンは堤体地盤が砂質土主体となる。ゾーンのうち、盛土下部に砂礫層が卓越している範囲を -2 ゾーンとし、その上、下流部を -1、-3 ゾーンとして区別した。以下に示す検討断面は、それぞれのゾーンから、天端舗装、護岸の有無、裏のり先舗装の有無を考慮し、代表的な断面を選定した。なお、4.1km、4.7km 付近における検討対象モデルの設定は、ボーリング調査、開削調査結果を主体とした。4.5km、4.8km 付近での検討対象モデルは、ボーリング調査は天端付近のみであることから、物理探査結果を併用して設定した。

- 4.1km 付近：（堤体地盤：粘性土主体、天端舗装：有、護岸：無、裏のり先舗装：有）
- 4.5km 付近：（堤体地盤：砂質土主体、天端舗装：有、護岸：無、裏のり先舗装：有）
- 4.7km 付近：（堤体地盤：砂質土主体、天端舗装：無、護岸：有、裏のり先舗装：有）
- 4.8km 付近：（堤体地盤：砂質土主体、天端舗装：無、護岸：無、裏のり先舗装：無）

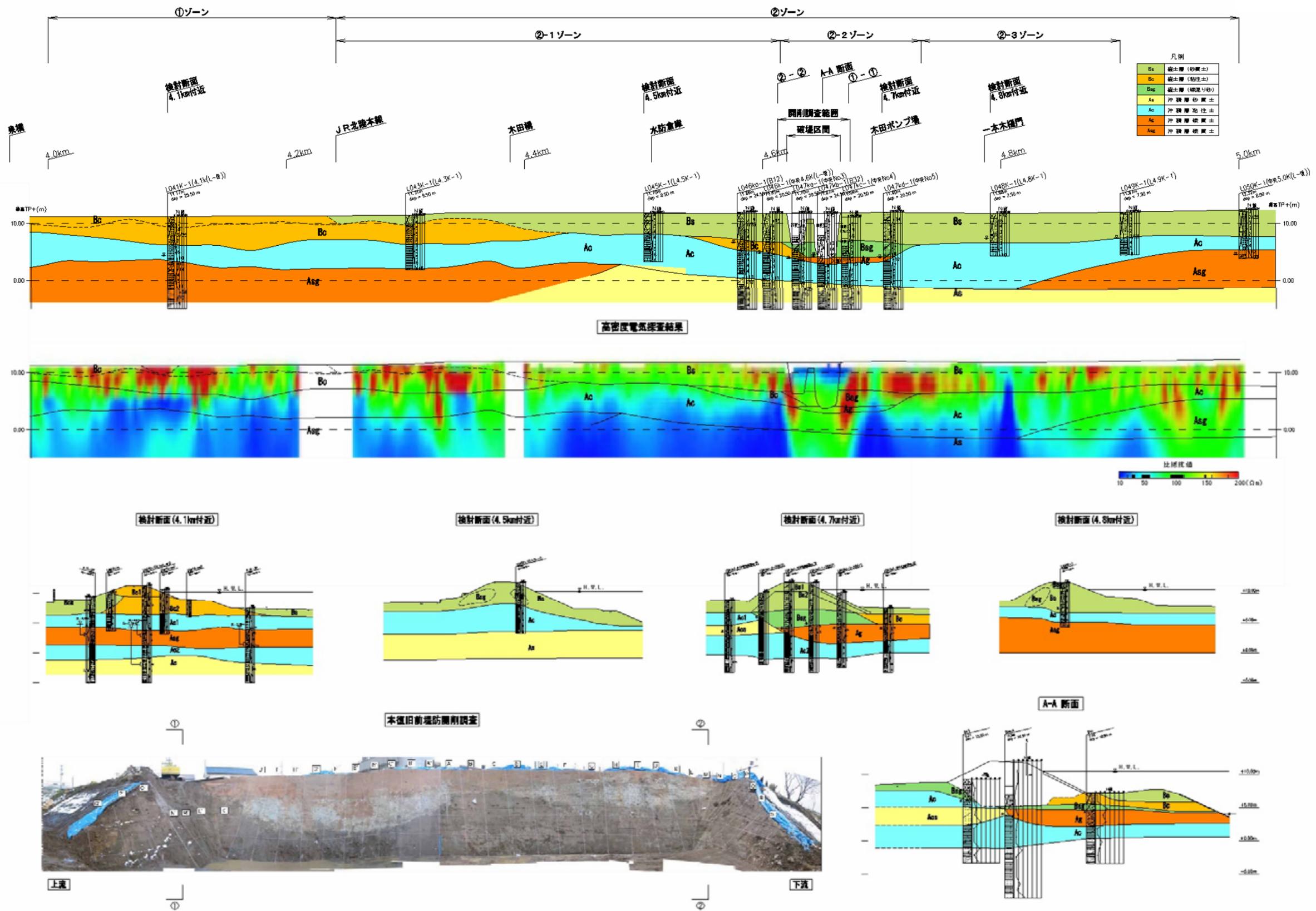


図-3.3.4 想定地層図 (足羽川左岸：4.0km 付近～5.0km 付近)

3.3.2 被災状況

写真記録、周辺住民からの聞き取り調査、報道機関の情報による破堤部における破堤状況の経時変化を整理したものを図-3.3.5 に示す。

越水区間における代表的な被災状況を図-3.3.6、図-3.3.7 に示す。これら被災状況を堤体構造、堤体土質により大別し次に整理する。

(1) 全区間における川表のり肩、川表のり面（状況写真無）

⇒ 川表のり肩、川表のり面とも現地調査から被災は確認されなかった。

(2) JR 北陸本線（4.2km 付近）より下流 【天端舗装：有、堤体地盤：粘性土、護岸：無】

- ・ 裏のり面侵食（図-3.3.6 参照）

⇒ 比較的軽微な裏のり表面のガリー状の侵食や表面植生の侵食が確認された。

- ・ 裏のり勾配変化点における応急対策（図-3.3.6 参照）

⇒ 裏のり尻に土留工（擁壁、石積み、ブロック）があり、のり面とこの土留工変化点において軽微な侵食が発生しており応急対策として土嚢が施された。

(3) JR 北陸本線～木田橋（4.4km 付近） 【天端舗装：有、堤体地盤：砂質土、護岸：無】

- ・ 裏のり肩侵食、崩壊（図-3.3.6 参照）

⇒ 裏のり肩付近に侵食、崩壊が確認された。裏のり先に土嚢による応急対策を施しているがのり尻における被災は確認されていない。

(4) 木田橋～破堤箇所（4.6km+50m 付近） 【天端舗装：有、堤体地盤：砂質土、護岸：無一部有】

- ・ 裏のり面崩壊（図-3.3.6 参照）

⇒ 一部裏のり肩からのり面にかけて土嚢による応急対策が施されており、裏のり肩からのり面中間部にわたり崩壊が生じたと思われる。のり先に応急対策の土嚢が施されているが、のり先での被災は確認されていない。

(5) 破堤箇所付近 【天端舗装：無、堤体地盤：砂質土、護岸：有】

- ・ 破堤（図-3.3.7 、 、 参照）

⇒ 周辺住民からの聞き取り調査によると、破堤部より下流（坂路天端付近）で天端から 50cm 程度下方で漏水が生じ、坂路天端から越水が始まった。越水発生後しばらくして避難したため破堤過程を目撃していない。しかしながら、越水までは堤体に変状は起きていないことを、この聞き取り調査から確認した。報道写真より、破堤部上・下流端の裏のり肩から破堤が進行したことが確認できる。

(6) 破堤箇所より上流 【天端舗装：無、堤体地盤：砂質土、護岸：無】

- ・ 裏のり面崩壊（図-3.3.7 、 、 参照）

⇒ 破堤箇所下流と比較してやや多く、裏のり面の崩壊箇所が確認された。この崩壊は裏のり全体を含むような大きなものとなっている。

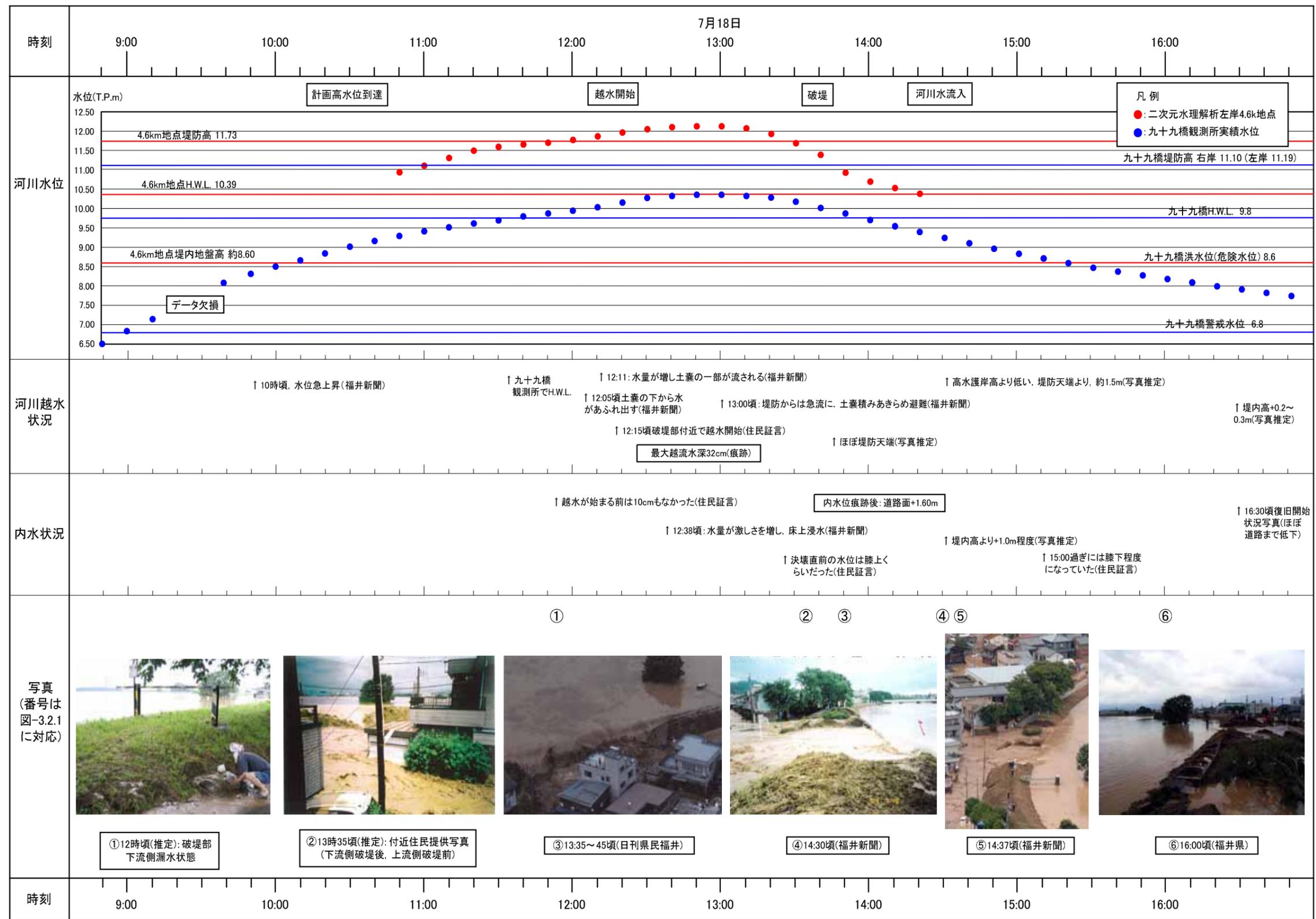
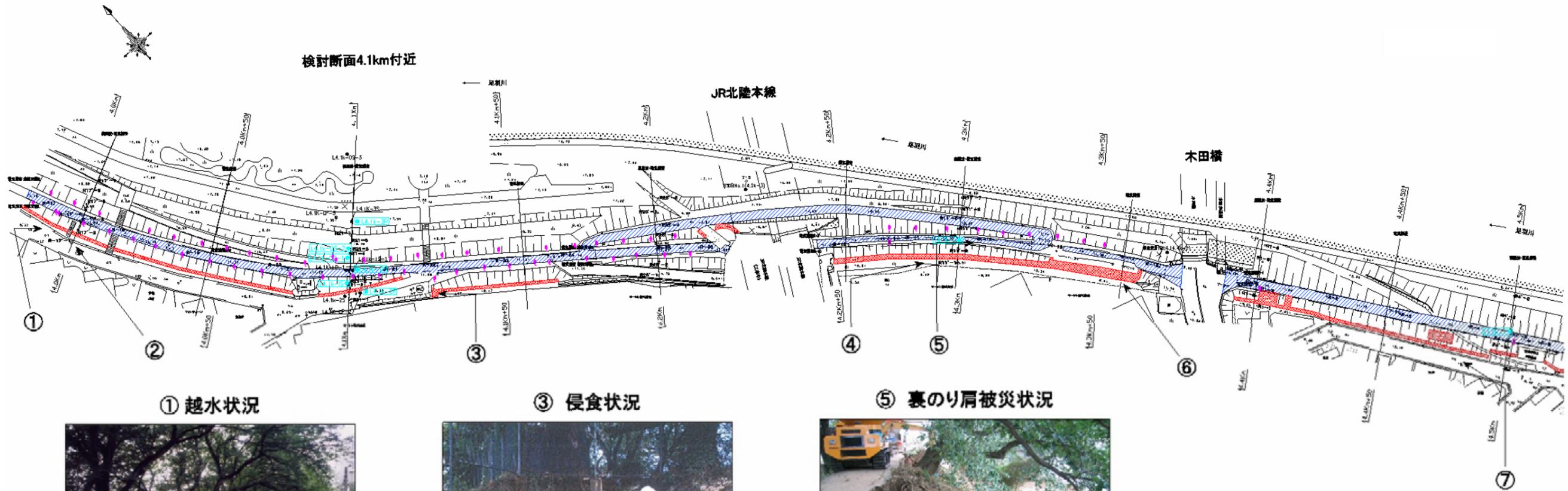


図-3.3.5 破堤部付近の状況経時変化図



① 越水状況



③ 侵食状況



⑤ 裏のり肩被災状況



⑦ 裏のり面崩壊に対する応急対策



② 勾配変化点での浸食に対する応急対策



④ 応急対策状況



⑥ 裏のり応急対策状況



図-3.3.6 被災状況平面図(足羽川左岸 4.0km 付近 ~ 4.5km 付近)

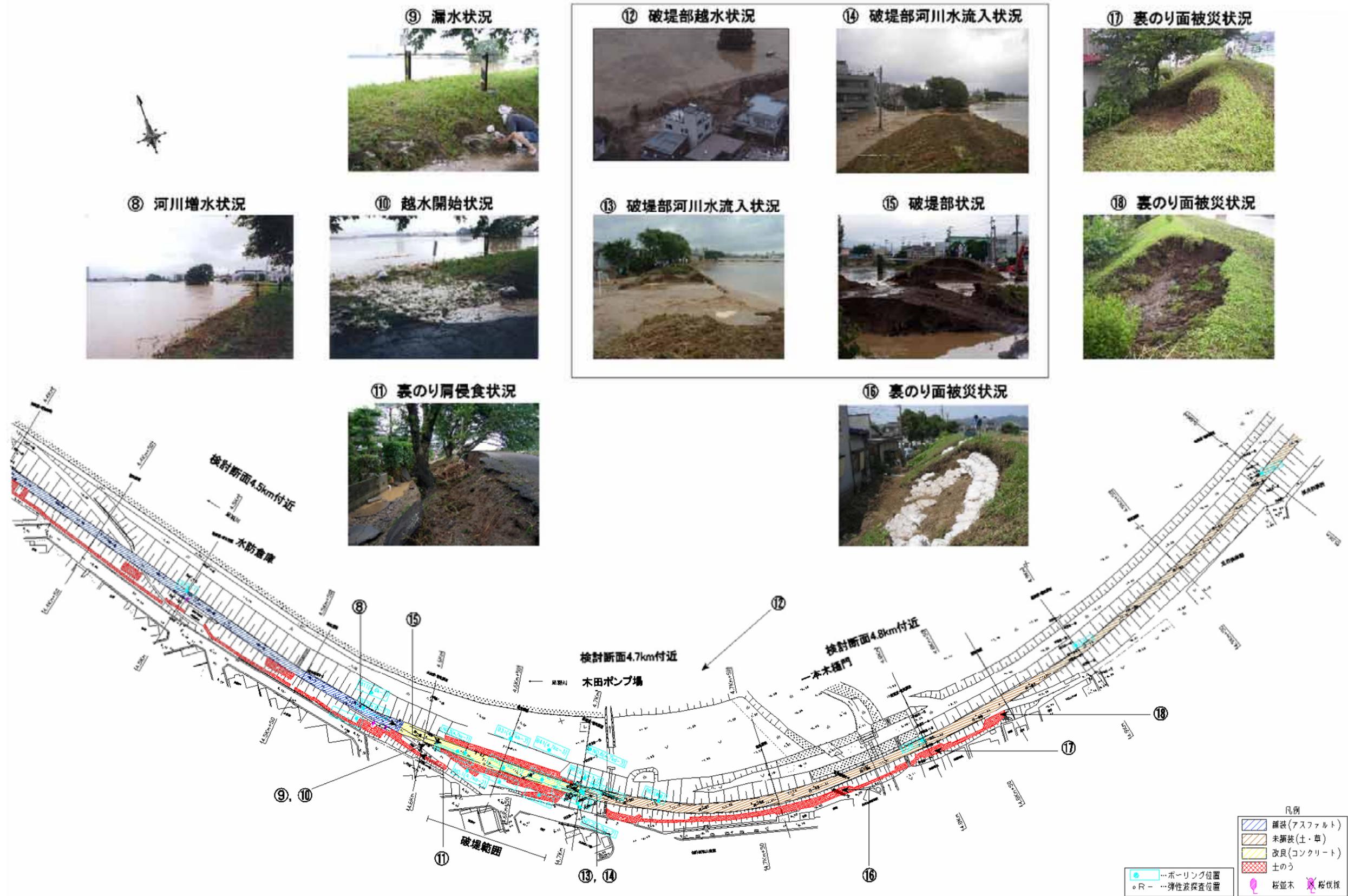


図-3.3.7 被災状況平面図(足羽川左岸 4.5km 付近~5.0km 付近)

3.3.3 破堤要因の推定

河川堤防の致命的な被害は破堤であり、過去の事例から破堤の多くは水位が堤防を上回り生じる越水に起因するものとされている。一方、昭和 51 年 9 月の長良川安八地区における破堤は、多量の降雨と長時間にわたる高水位のもとでの浸透に起因するものとされている。また、昭和 49 年 9 月の多摩川狛江地区における破堤は、堰周辺の迂回流による侵食に起因する。小貝川の高須地区（昭和 56 年 8 月）および本豊田地区（昭和 61 年 8 月）における破堤は、樋門周辺の堤体が弱体化していたことに起因するとされている。

この越水破堤のプロセスは、既往文献（「河川の減災マニュアル」末次忠司著 山海堂）において水理模型実験により、ある程度明らかになっていると記されている。堤防を越水した流れは堤防の裏のり尻付近でもっとも大きなせん断力を発生させ、侵食を引き起こす。洪水時は堤体が水を含んで大きな重量となっているので、侵食後に不安定となった堤体は崩落し始める。すなわち、越水流により表面侵食を受けるといふより、土塊状に崩落を繰り返して、破堤に至ると示されている。

本豪雨における破堤は、越水区間において発生していることから、破堤区間約 60m を含む越水区間約 900m を対象にして破堤要因を推定することとし、情報・調査による破堤要因の考察、越水洗掘破壊に対する検討、浸透破壊に対する検討を行った。

以下にこれら検討結果の概要を示す。

（１）情報・調査による破堤要因の考察

前述の堤防、地盤、被災状況から破堤要因に関する考察結果を次に示す。

- ・ 河道内流水による侵食現象は、表のりや高水敷などには変状が見られないことから、この侵食現象が堤体の変状や破堤の要因であった可能性は低いと判断できる。
- ・ 越水区間において部分的に生じている川裏のり面の表面侵食から、越流水の掃流力により堤体を構成する土粒子が移動したことが推察され、この越水侵食が破堤要因と考えられる。（図-3.3.6 参照）
 - ⇒ 豪雨後の痕跡水位調査から、破堤部付近における越流水深が 32cm と一番大きい。なお、越水継続時間は水理解析から破堤地点で約 90 分と推定している。
- ・ 堤防の被災誘因に挙げられるモグラ穴は存在するものの、この穴からの漏水、周辺部の侵食は聞き取り、現地調査で確認されなかったことから、破堤要因の可能性は低い。
- ・ JR 北陸本線から上流では局所的に裏のり肩から鉛直にえぐられた崩壊が生じており、この被災形状から越水侵食とこれに伴うすべり破壊、崩壊が発生したと思われ、破堤要因の可能性がある。（図-3.3.7 、 、 参照）
 - ⇒ この JR 北陸本線から上流は、堤体地盤が砂質土主体であることが特徴であり、この堤体地盤が砂質土の場合、粘性土と比較してこの被災の可能性が高いと考えられる。
 - ⇒ この区間で破堤部より下流は堤防天端にアスファルト舗装が施されており、未舗装部と比較すると、未舗装部における被災の方が大きい。この被災調査結果より、堤防天端の舗装が無い場合は堤防天端からの降雨、越水による堤体浸透を助長することから被災誘因と思われる。

(2) 越水洗掘破壊に対する検討

「河川堤防設計指針(第3稿)、平成12年6月」および「越水に対する堤防強化設計に手引き(案)、平成10年10月」に準じて、越水洗掘による変状の可能性について検討を行った。本検討は、痕跡水位が確認された4.0km、4.2km、4.4km、4.6km、4.8km地点における越水深を外力条件として、越流区間における堤防状況(表面材料:アスファルト、張り芝、裸地)堤防構造(のり面の傾斜角)を踏まえ、生じるせん断力とその部位のせん断耐力 τ_a とを比較することで照査した。照査にあたっては、天端、裏のり面、裏のり先の各部位で行った。なお、裏のり先における照査は、越流水による衝撃力は考慮していない。

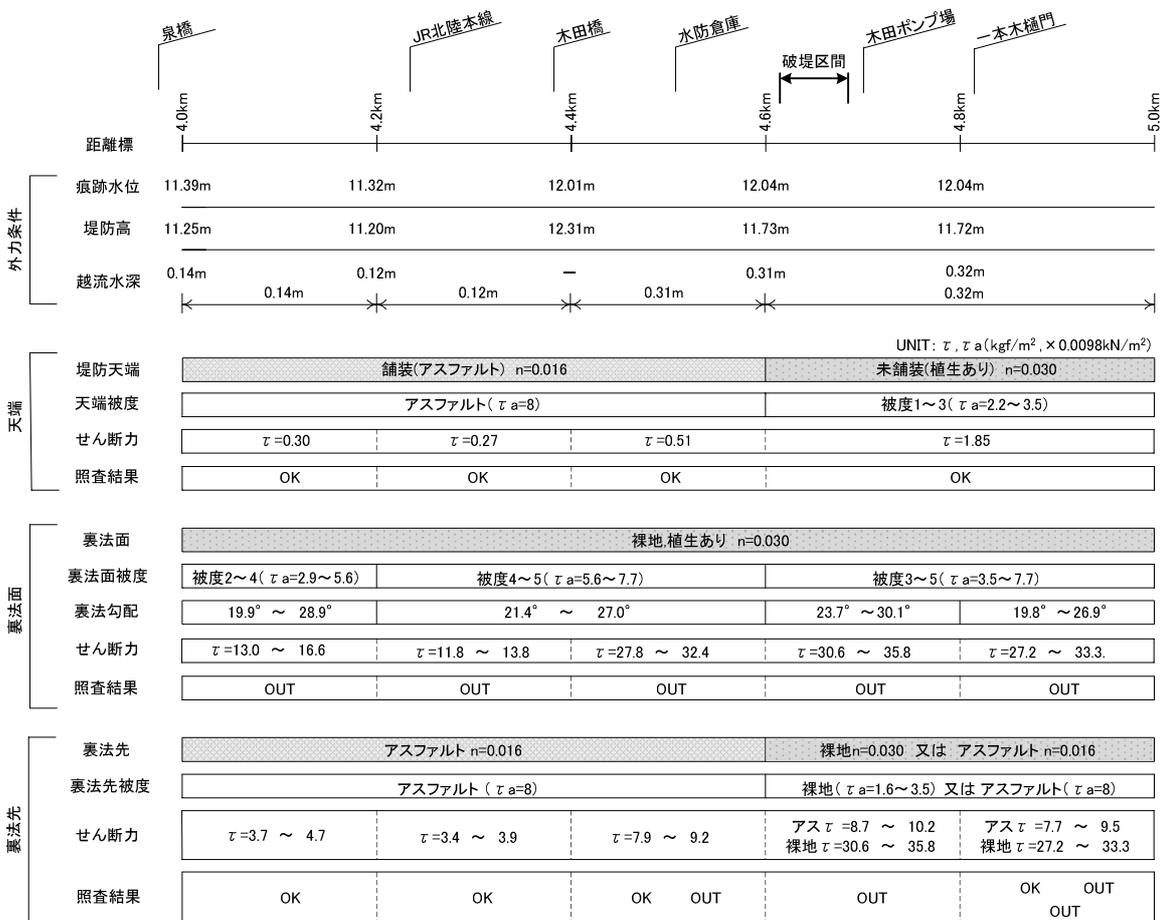
照査結果を図-3.3.8に示す。

この結果図に示すように、天端部ではアスファルト舗装の有無に関わらず許容せん断力を満足することから、越流洗掘は発生しないと判断できる。しかしながら、上流部では被度が低い箇所もあることから、許容値に近いせん断力となっている。

一方、裏のり面部は、一部被度が大きい箇所では許容値を満足するが、せん断力は許容値を大きく上回り越水深に関わらず越水洗掘が生じた可能性が高いと考えられる。

裏のり先は、越水深が30cmを超える区間において未舗装部分は大きく許容せん断力を超え、アスファルト舗装部は若干ではあるが許容値を上回る結果となった。

これら照査結果から、裏のり面、裏のり尻部においては越水洗掘の可能性があるとと思われる。



裏のり先における照査には、越流水による衝撃力は考慮していない。

図-3.3.8 越水洗掘破壊に対する照査結果図

(3) 浸透破壊に対する検討

河川堤防の浸透破壊は、大別すると次の二つが挙げられる。

降雨と河川水の複合要因による堤防の浸透破壊 すべり破壊、崩壊

⇒ 降雨、河川水の浸透により、堤体内の浸潤面が上昇し、それに伴う飽和度の上昇により土の強度が低下することによって発生する。

堤体、基礎地盤の局所浸透破壊 パイピング

⇒ 局所の動水勾配あるいは浸透流速が限界値を超えて土の組織破壊(浸透破壊)が起こり、それが進行して基礎地盤の陥没や堤体裏のり尻付近で湧水に伴う土の洗い出しを起こして堤体を破壊する。

本検討では、のすべり破壊とのパイピング破壊に対して、飽和・不飽和浸透流解析を用いて堤体内の浸潤面の挙動をシミュレートし、その解析結果を用いて各破壊に対する照査を実施した。

の崩壊に対しては、土-水連成地盤解析(土-水連成弾性FEM解析)を用いて、堤体内浸潤面の挙動に伴う、各要素におけるせん断破壊に対する安全率(せん断強度/せん断力)による評価を行った。

各検討に用いた地盤定数を表-3.3.1に示す。

表-3.3.1 浸透破壊に対する検討に用いた土質定数

検討断面	土層	湿潤密度 $t(\text{tf}/\text{m}^3)$ ($\times 9.81\text{kN}/\text{m}^3$)	飽和密度 $sat(\text{tf}/\text{m}^3)$ ($\times 9.81\text{kN}/\text{m}^3$)	粘着力 $C(\text{tf}/\text{m}^2)$ ($\times 9.81\text{kN}/\text{m}^2$)	内部摩擦角 (deg)	透水係数 (水平方向) $kh(\text{cm}/\text{s})$	透水係数 (鉛直方向) $kv(\text{cm}/\text{s})$	変形係数 $E(\text{tf}/\text{m}^2)$ ($\times 9.81\text{kN}/\text{m}^2$)	ポアソン比
4.1km	Bc1	1.73	1.76	0.15	21.8	6.58E-04	6.58E-04	1,690	0.45
	Bcs	1.91	1.91	4.64	0.0	6.58E-04	6.58E-05	855	0.45
	Bc2	1.87	1.91	1.40	26.9	2.02E-04	2.02E-04	1,288	0.45
	Bs	1.72	1.88	1.07	38.9	2.17E-03	2.17E-04	2,800	0.3
	Ac1	-	1.81	4.59	0.0	1.00E-05	1.00E-05	924	0.45
	Asg	-	2.15	1.88	41.4	2.25E-03	2.25E-04	2,701	0.3
4.5km	Bs	1.79	1.90	0.04	35.9	5.00E-03	5.00E-04	1,036	0.3
	Bsg	1.84	1.99	0.69	33.6	1.00E-02	1.00E-03	1,960	0.3
	Ac	-	1.78	6.60	0.0	1.00E-05	1.00E-05	1,540	0.45
	As	-	1.86	0.97	34.5	3.30E-03	3.30E-04	3,358	0.3
4.7km	Bs1	1.79	1.90	0.04	35.9	5.00E-03	5.00E-04	1,960	0.3
	Bs2	1.73	1.91	0.40	30.3	5.00E-03	5.00E-04	1,552	0.3
	Bsg	1.84	1.99	0.69	33.6	1.00E-02	1.00E-03	1,960	0.3
	Bs3	1.79	1.90	0.04	35.9	5.00E-03	5.00E-04	1,680	0.3
	Bc	1.87	1.90	1.29	30.9	1.00E-05	1.00E-05	1,820	0.45
	Ag	-	2.15	1.88	41.4	3.30E-03	3.30E-04	4,052	0.3
	Ac1	-	1.76	7.73	0.0	1.00E-05	1.00E-05	1,120	0.45
	Acs	-	1.79	6.00	0.0	1.00E-03	1.00E-04	1,679	0.45
4.8km	Ac2	-	1.72	6.00	0.0	1.00E-05	1.00E-05	1,191	0.45
	Bs	1.79	1.90	0.04	35.9	5.00E-03	5.00E-04	1,680	0.3
	Bsg	1.84	1.99	0.69	33.6	1.00E-02	1.00E-03	1,960	0.3
	Ac	-	1.78	6.60	0.0	1.00E-05	1.00E-05	1,120	0.45
	Asg	-	2.15	1.88	41.4	3.30E-03	3.30E-04	2,800	0.3

飽和・不飽和浸透流解析による堤体内浸潤面の把握

浸透破壊に対する検討は、図-3.3.9 に示す福井豪雨における降雨・洪水（河川水）を外力条件とした。図-3.3.9 は 4.7km 地点における外力条件を示しており、河川距離標以外の検討箇所（4.5km、4.7km）は上下流の河川距離標におけるデータを内挿して設定した。検討にあたっては、堤体内浸透水を飽和・不飽和浸透流解析を用い想定し、この浸透水によるすべり破壊、浸食（パイピング）破壊に対する安定性を検討した。この飽和・不飽和浸透流解析は、検討対象断面を鉛直 2 次元にモデル化し降雨・洪水の経時変化毎に非定常解析を実施した。

代表的な外力条件時での解析結果を図-3.3.10 に示す。

なお、越水時における解析は、越水による浸透のみを外力として作用させたもので、越水による洗掘は考慮していない。

堤体土質の違いに着目すると、4.1km は粘性土が主体となっていることから、初期の飽和度は高いものの、越水により浸潤面は裏のり面にごくわずかに現れているだけである。一方、他の断面では堤防構造による違いはあるものの、裏のり面に浸潤面が形成されている。この浸潤面の形成による裏のり部の飽和域の増大により堤体が強度低下すると考えられる。

砂質土主体の断面（4.5km、4.7km、4.8km）において堤防天端条件の違いに着目すると、4.7km、4.8km はアスファルト舗装が施されていないことから、降雨・越水による天端付近の飽和域は広がり、河道内水位からの浸透域を助長し、裏のり表層部に浸潤域が及んでいる。この裏のりの浸潤域は、のり尻から上昇するものでなく、表層部から形成されており堤体裏のり尻から堤体中央に不飽和域が残るような状態となっていることが特徴的である。裏のり部の浸潤域では、局所的な崩壊が各所にあったように、この浸潤域の強度低下による堤防破壊が推察できる。

4.7km は川表のり面にのり枠護岸が設置されているが、本検討では盛土層の 1 オーダー小さい透水係数としてこの護岸を取り扱っていることもあり、さほど浸潤面の挙動に大きくは寄与していない結果となっている。

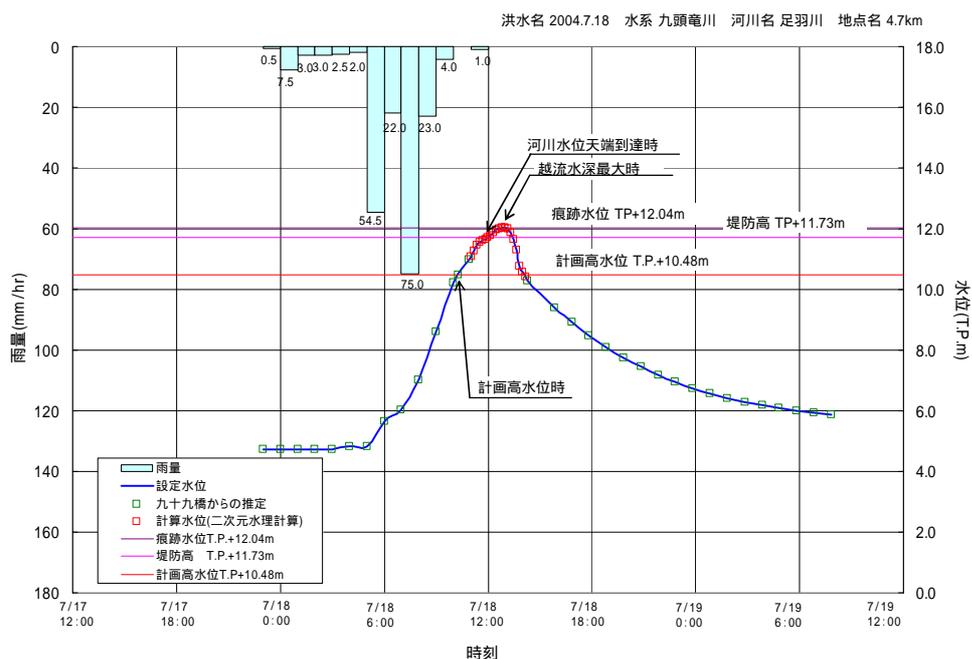
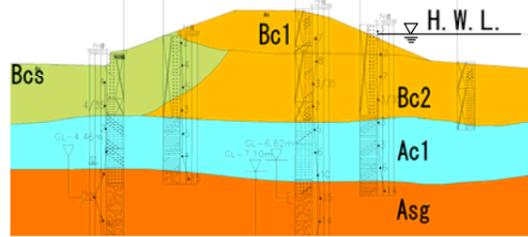


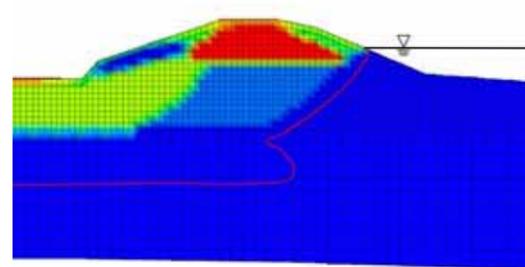
図-3.3.9 浸透破壊に対する検討に用いた外力条件（4.7km 検討対象断面）

4.1km

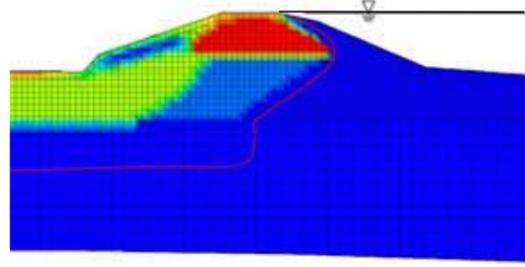
- ・堤体地盤:粘性土主体
- ・天端舗装:有
- ・護岸無:無
- ・裏のり先舗装:有



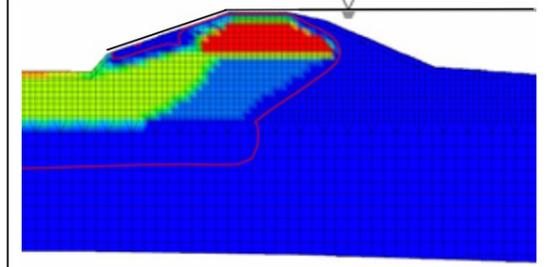
解析モデル



計画高水位時



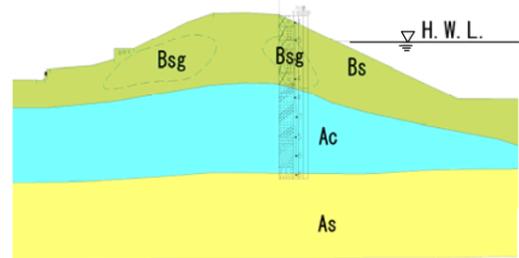
河川水位天端到達時



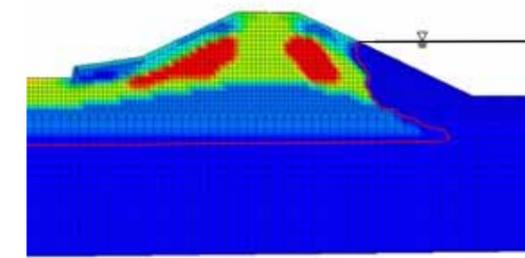
越流水深最大時(越流水深:14cm)

4.5km

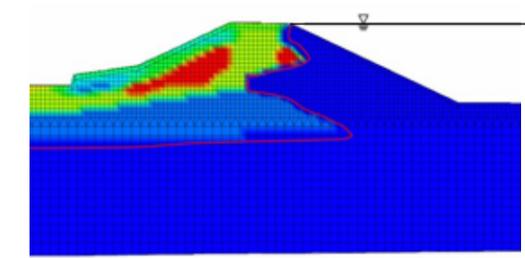
- ・堤体地盤:砂質土主体
- ・天端舗装:有
- ・護岸:無
- ・裏のり先舗装:有



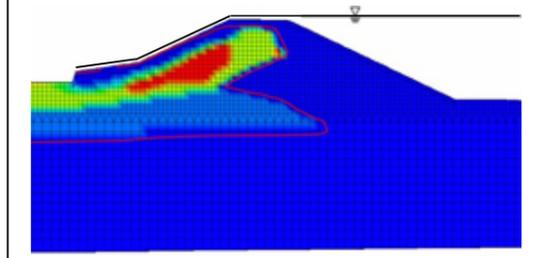
解析モデル



計画高水位時



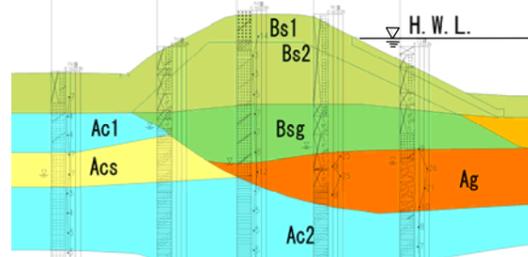
河川水位天端到達時



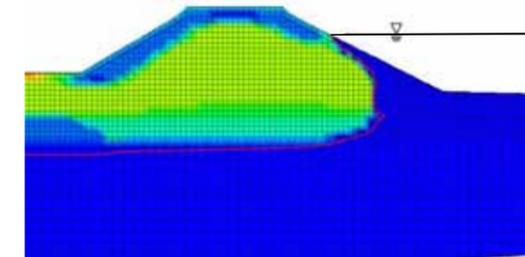
越流水深最大時(越流水深:31cm)

4.7km

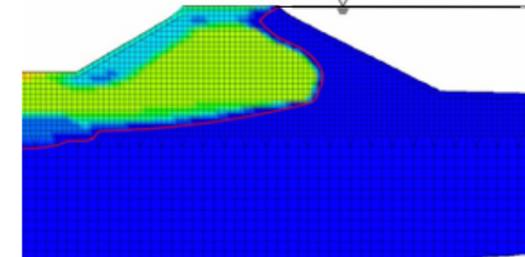
- ・堤体地盤:砂質土主体
- ・天端舗装:無
- ・護岸:有
- ・裏のり先舗装:有



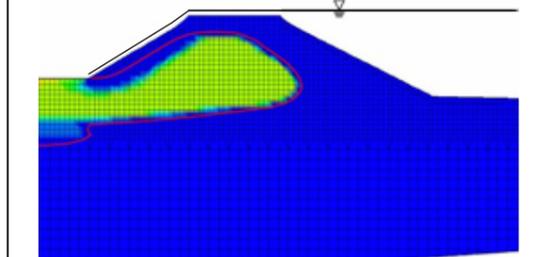
解析モデル



計画高水位時



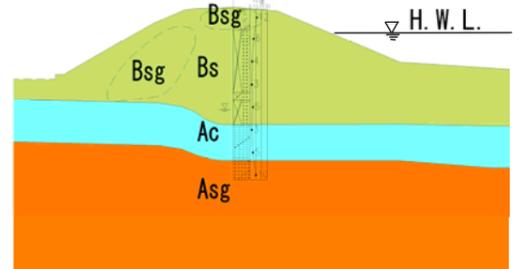
河川水位天端到達時



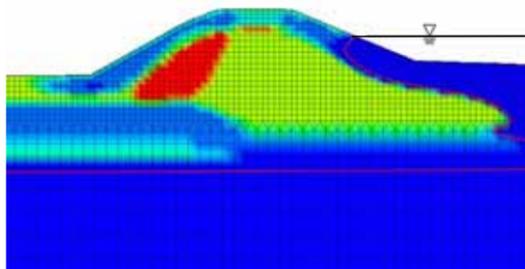
越流水深最大時(越流水深:32cm)

4.8km

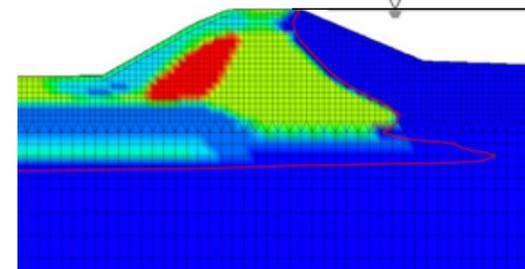
- ・堤体地盤:砂質土主体
- ・天端舗装:無
- ・護岸:無
- ・裏のり先舗装:無



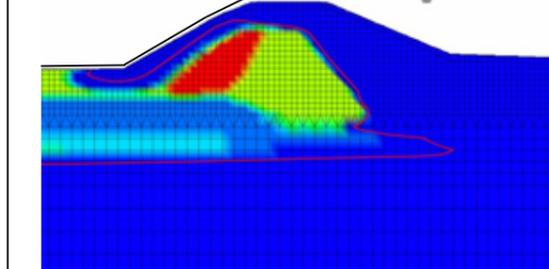
解析モデル



計画高水位時



河川水位天端到達時



越流水深最大時(越流水深:32cm)

図-3.3.10 飽和・不飽和浸透流解析結果

越流後の検討には、越水侵食(洗掘)作用は考慮していないため参考値として扱う。

円弧すべり計算によるすべり破壊に対する検討

現地被災調査において、越水による侵食と局所的なすべり破壊と考えられる堤防崩壊が木田橋（4.4km 付近）から上流で数カ所確認された。この堤防崩壊に対するすべり破壊の要因を考察する目的から、飽和・不飽和浸透流解析で得られた堤体内浸潤面を簡便分割法による円弧すべり計算に適用し、堤内側での最小すべり安全率を算出した。堤内のり面に着目し、もっとも最小すべり安全率が低い時の結果図を図-3.3.11 に示す。

河川水位が堤防天端到達時（越水前）では、堤体内浸透水が堤内側に達していないことから、現状における堤防の最小すべり安全率となる。各検討断面で堤防形状、地盤特性は異なるものの最小すべり安全率は 1.0 以上となり、堤内側のり面においてすべり破壊が発生した可能性は低いと考えられる。

一方、越水深最大時頃では、堤体土質が砂質土主体で天端にアスファルト舗装が施されていない 4.7km、4.8km 断面は、前述したように浸潤域が堤防裏のり表層部に浸透していることから、最小すべり安全率は 1.0 を下回る結果となっており、本豪雨で堤防裏のりにおいてすべり破壊の発生した可能性は高いと推察できる。現地調査において図-3.3.7、図-3.3.8 に示すようにのり尻付近の崩壊が生じたことが確認されている。これより、被災状況とこのすべり破壊に対する検討とが概ね一致する。

ただし、4.5km 断面では、浸透流解析において裏のり表面のみに浸透水が到達していることから、最小すべり安全率は 1.0 を上回る結果となっているものの、現地調査においては図-3.3.6

に示すように局所的な崩壊が確認されていることから、若干の地盤条件の違いによってはこのすべり破壊の発生する可能性はあると考えられる。

堤体土質が粘性土主体である 4.1km 断面では、透水性が低いこと、せん断強度は粘着力が主体であることから、有効応力（水位の変化）の変動によるせん断強度は一定である。このため、すべり破壊の可能性は低いと判断できる。

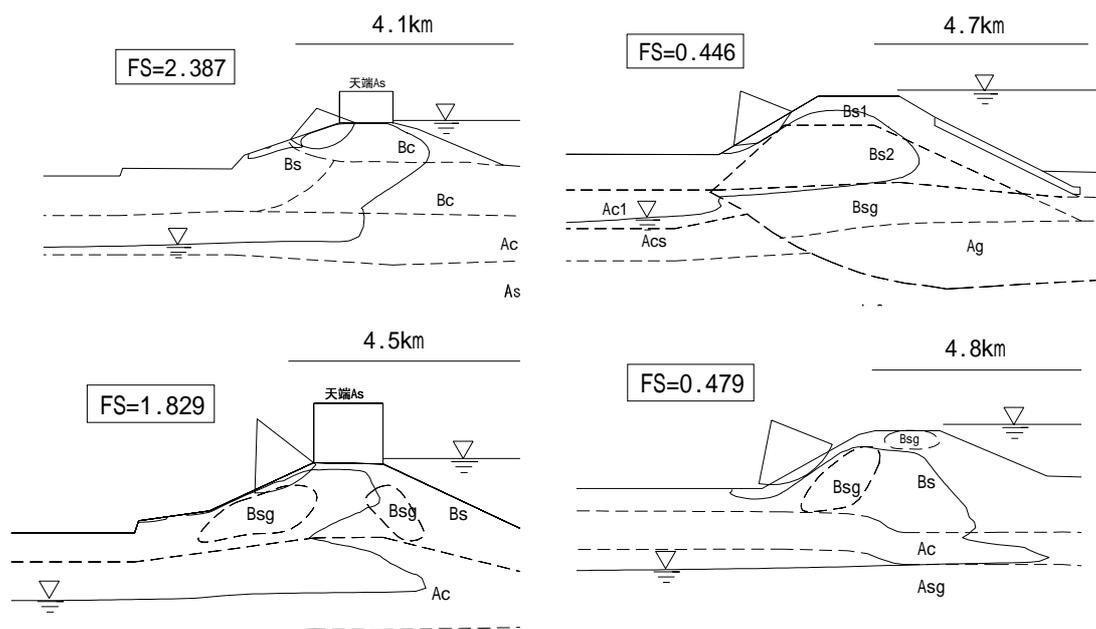


図-3.3.11 円弧すべり計算結果図（越流水深最大時：裏のり安全率最小時）

本豪雨では、川表側に被災は見られなかったものの、浸透に対するすべり安定性を把握する目的から、各検討対象地点における川表側を対象とした円弧すべり計算を実施した。

水位低下過程における最小すべり安全率がもっとも低い時の計算結果を図-3.3.12 に示す。これら結果図から、水位低下時において浸透に対する川表側すべり安定性は確保されていたと判断できる。

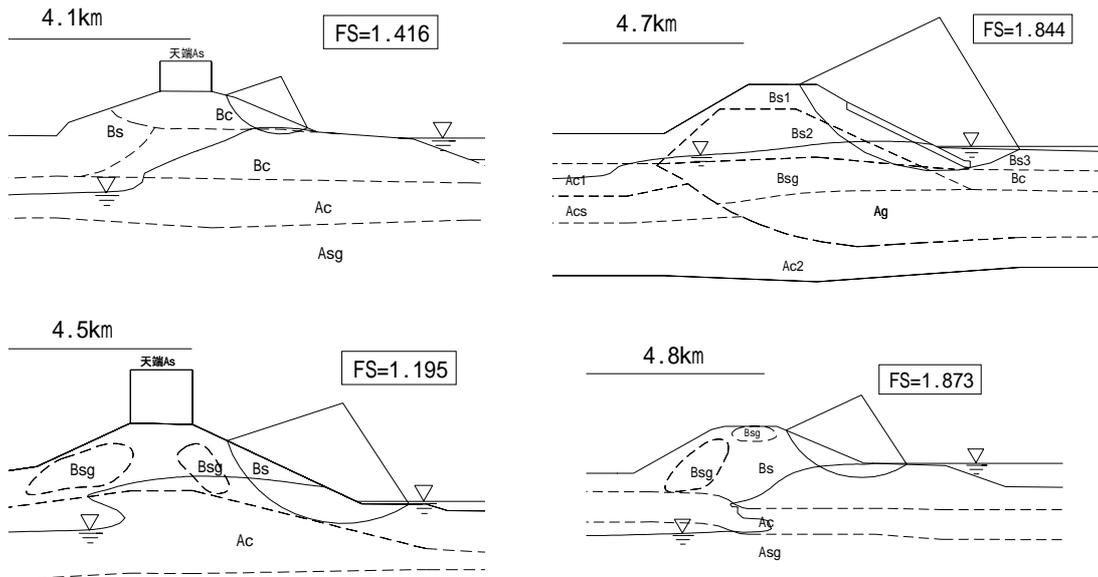


図-3.3.12 円弧すべり計算結果図（水位低下時：表のり安全率最小時）

限界動水勾配によるパイピング破壊に対する検討

パイピングは浸透水（浸透力）により土粒子が流失し、地盤内にパイプ状の孔や水みちができる現象をいい、一部でパイピングが発生すると、その部分での動水勾配が大きくなり、それによって浸透力が増大し、さらにパイピングが助長、進行するような進行性破壊の形態となる。

本検討では、飽和・不飽和浸透流解析から得られる浸透水の動水勾配と各地盤における限界動水勾配との比により照査した。各検討対象地点において堤内側のり面の浸潤域が最大となる時の水平方向、鉛直方向の照査結果図を図-3.3.13に示す。

この結果図より、各断面ともこの照査値（限界動水勾配 / 動水勾配）は1.0以上となり、発生する動水勾配は地盤の限界動水勾配を下回ることから、パイピングの発生の可能性は低いと考えられる。

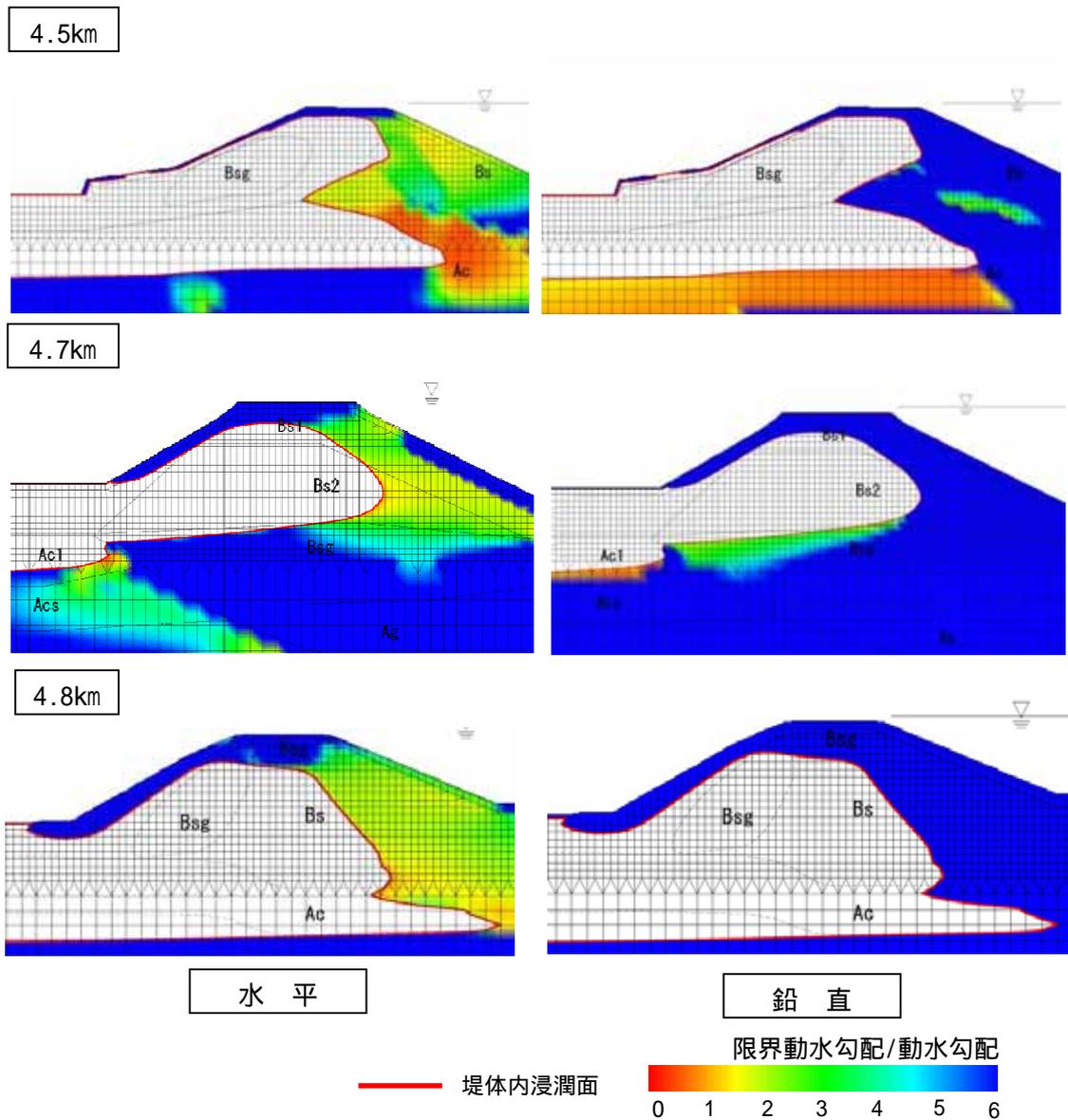


図-3.3.13 パイピングに対する照査結果図（左 水平方向、右 鉛直方向）

土 - 水連成地盤解析による堤体崩壊に対する検討

前述のすべり破壊はせん断破壊ではあるが、破壊モードを円弧と仮定した検討手法である。そこで、実際の土の挙動をより詳細に把握する目的から、前述の飽和・不飽和浸透流解析における水圧と地盤の応力解析における間隙水圧とを連成させる土 - 水連成地盤解析を行った。

この解析は、降雨・洪水による堤体内の間隙水圧の変動に対する地盤の有効応力の挙動を詳細に把握するものである。解析結果の評価にあたっては、得られたせん断応力と破壊基準 (Mohr-Coulomb) により各要素における安全率 (せん断強度 / せん断応力) を算出し用いた。

この検討に対する考察にあたっては、この安全率が 1.0 を下回る値の部位を脆弱域とする。

なお、本解析における地盤部材は、堤体内の浸潤面の挙動による地盤の変位 (ひずみ) が破堤箇所を除く部位において変状が顕著でないことから微少ひずみ領域と判断し、弾性部材とした。代表的な外力条件時の解析結果を図-3.3.14 に示す。

なお、越水時における解析は、越水による浸透のみを外力として作用させたもので、越水による洗掘は考慮していない。

この結果より、粘性土主体である 4.1km では、天端付近の表層部で安全率が 1.0 をやや下回る脆弱な部位があるものの、木田橋上流で確認された崩壊に至るような脆弱域は現れなかった。

砂質土主体である 4.5km、4.7km、4.8km では、粘性土主体の 4.1km に比べ裏のり面で浸潤域が広がっており、安全率が 1.0 を下回るせん断破壊の発生の可能性が高い脆弱域がある。

4.5km は天端のアスファルト舗装による遮水作用から、裏のり肩付近にのみ 1.0 以下の脆弱な部位がみられることが特徴となっている。この解析結果は、図-3.3.6 に示す被災状況と概ね一致すると考えられる。

4.7km は越水による天端付近と裏のり面に 1.0 以下の脆弱な部位が広く現れており、この脆弱域が広がっている。

4.8km は 4.7km と比較して堤防形状の違いから天端、裏のり面付近の浸潤域は狭くなっている。4.8km は堤内地盤が民家となっており表層部が透水性となることから、裏のり尻付近の堤内地盤に脆弱域となる 1.0 以下の部位が現れている。現地調査においても図-3.3.7 、 、 に示すようにのり尻付近の崩壊が生じたことが確認されている。これより、被災状況と解析結果とが概ね一致する。

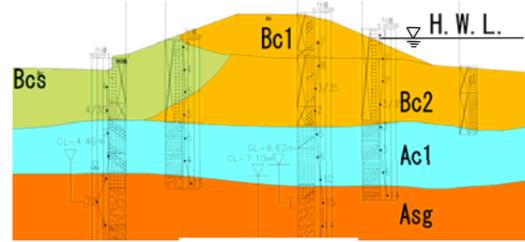
浸透破壊に対する考察

本検討結果から天端アスファルト舗装の有無は、浸透破壊に対し大きく作用する要因であることが分かった。また、堤体土質が砂層主体である場合、降雨・洪水の継続時間によっては堤体内浸潤域が増大し、破堤にいたる可能性も考えられる。

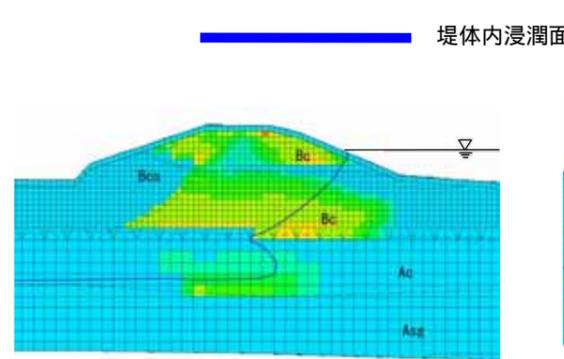
しかしながら、本検討結果から浸透による脆弱域は想定されたものの、この脆弱域の範囲を考えた場合、天端が崩壊するほどでは無いことから、本豪雨において浸透破壊だけで破堤に至ったとは考えにくい。

4.1km

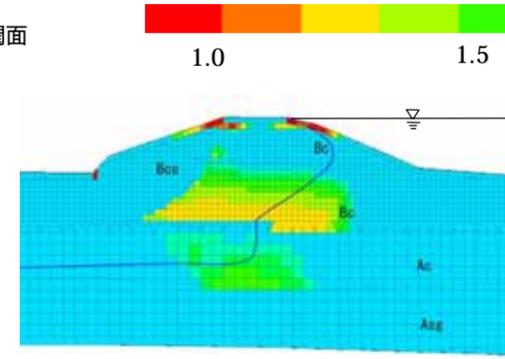
- ・堤体地盤:念制度主体
- ・天端舗装:有
- ・護岸無:無
- ・裏のり先舗装:有



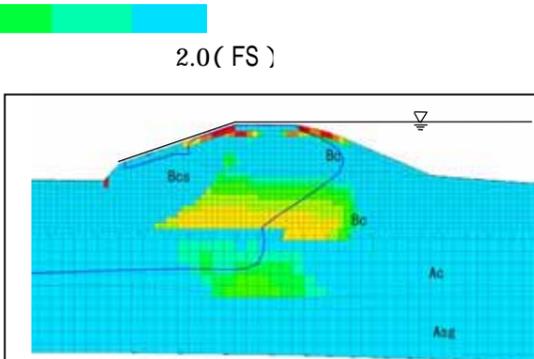
解析モデル



計画高水位時



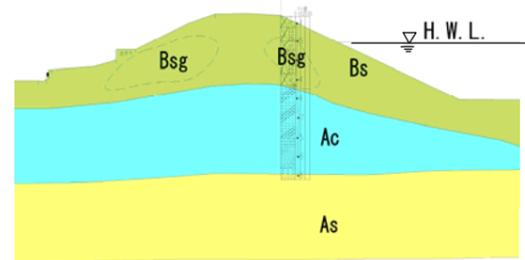
河川水位天端到達時



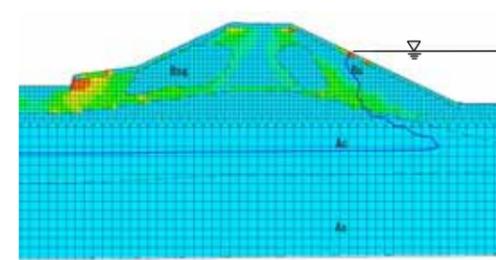
越流水深最大時(越流水深:14cm)

4.5km

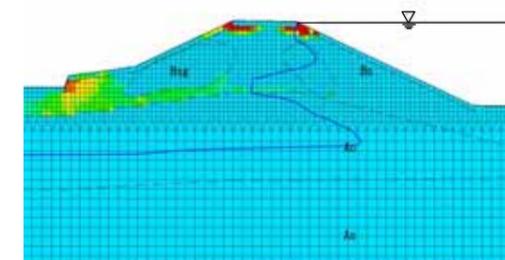
- ・堤体地盤:砂質土主体
- ・天端舗装:有
- ・護岸:無
- ・裏のり先舗装:有



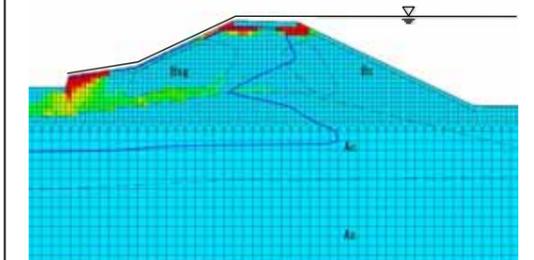
解析モデル



計画高水位時



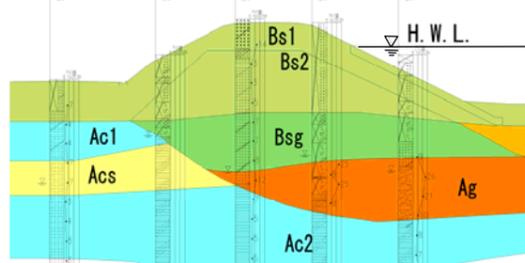
河川水位天端到達時



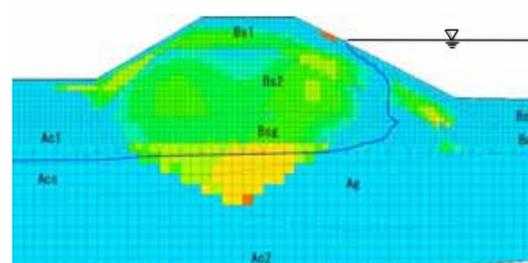
越流水深最大時(越流水深:31cm)

4.7km

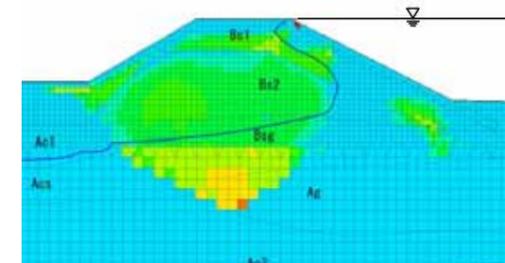
- ・堤体地盤:砂質土主体
- ・天端舗装:無
- ・護岸:有
- ・裏のり先舗装:有



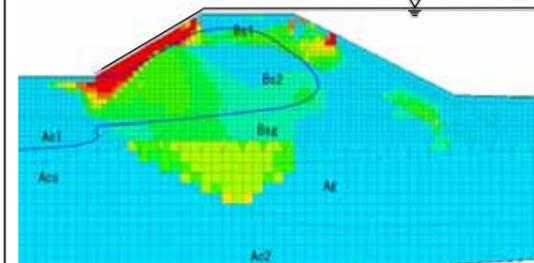
解析モデル



計画高水位時



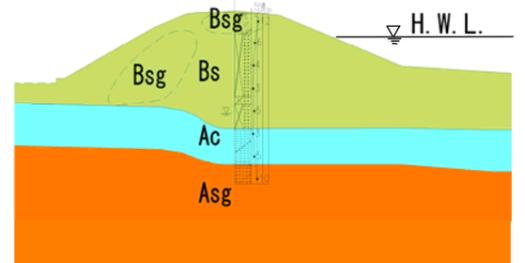
河川水位天端到達時



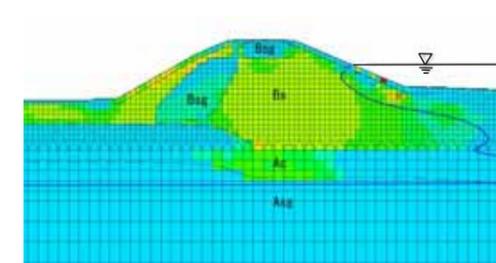
越流水深最大時(越流水深:32cm)

4.8km

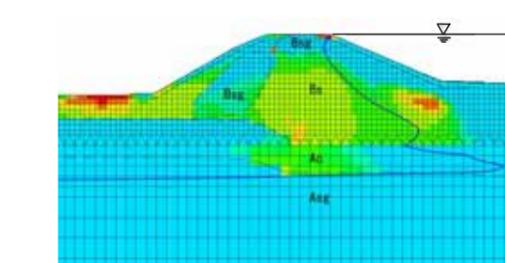
- ・堤体地盤:砂質土主体
- ・天端舗装:無
- ・護岸:無
- ・裏のり先舗装:無



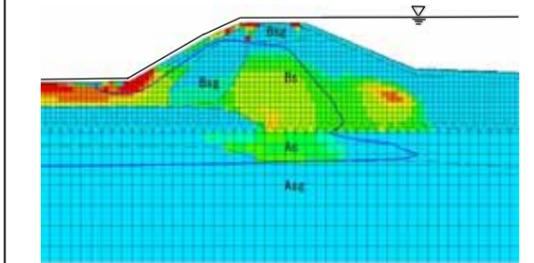
解析モデル



計画高水位時



河川水位天端到達



越流水深最大時(越流水深:32cm)

図-3.3.14 土 - 水連成地盤解析結果

越流後の検討には、越水侵食(洗掘)作用は考慮していないため参考値として扱う。

(4) 破堤要因の推定

平成16年7月福井豪雨での木田地区春日1丁目地先(足羽川左岸4.6km+50m付近)における破堤は、越水による侵食(洗掘)破壊と浸透による脆弱域の発生が複合的に作用し、局所的な破壊が進行して破堤に至ったと考えられる。

本検討委員会では、この破堤要因の推定にあたり、被災状況検討(情報に基づく破堤状況の整理)と解析(越水洗掘破壊、浸透破壊)を行った。これら検討結果より、図-3.3.15(各破堤過程における状況想定図、対応する記録写真、解析結果概要図)に示す破堤過程を推定した。

次に各破堤過程における推定概要を示す。

計画高水位到達(10:30頃)

- ・ 増水時の状況写真と撮影者からの聞き取りから、天端付近まで河川水位が上昇しているが、堤防は漏水、変状など被災は生じていないことが確認された。
- ・ 解析結果から、堤体内浸潤面は川表のり面付近には浸透しているが、堤体中央部にまでは至っていない。舗装が施されていない天端、裏のり面は、降雨の影響から飽和度が上昇する。
 - ⇒ 河川内水位が計画高水位の時点では、堤防は安定性を保持していたと判断できる。

越水開始(12:15頃)

- ・ 河川内水位が堤防天端に達した頃、破堤箇所よりやや下流で越水が発生したことが目撃され写真に記録されている。この一部での越水開始前に、その越水箇所近傍(堤防天端よりやや下方)で漏水が生じ、周辺住民が対策を行ったことが記録されている。
- ・ 解析結果からは、計画高水位到達時より川表側のり面における浸潤域は進行しているが、他の堤防状況は計画高水位到達時と同様である。
 - ⇒ 聞き取り調査では局所的な漏水が確認されており、この漏水は破堤箇所とは異なることと、解析結果から浸潤域、脆弱域とも裏のり面に至っていないことから、破堤要因とは考えにくい。この漏水は築堤履歴に伴う層境などの要因により漏水が発生した局所的な水みちによるものと思われる。

破堤(13:35~13:45頃)

- ・ 周辺住民の聞き取り調査では、12時頃から土嚢積みをあきらめ避難し、破堤の詳細な時刻は確認できなかった。この聞き取り調査では、越水の初期の段階では破堤部において堤体表層侵食(洗掘、剥ぎ取り)は発生していないことが分かった。破堤は報道写真から、破堤域の上・下流端で発生し、堤防裏のり肩付近から進行したと推定できる。破堤部付近より上流の越水区間では、豪雨後の現地調査から堤防天端付近で大きな裏のり変状の発生が確認された。
- ・ 裏のり面では越水によるせん断力が許容値を大きく上回る解析結果となることから、洗掘破壊が生じていたと判断できる。堤体浸透に着目すると、地下水初期状態は被圧状態と考えられることから、河川水による浸透で堤体内水位が川裏側のり尻から上昇せず、降雨、越水による浸透が河川水による堤体内水位の進行を助長し、川裏側のり面表層付近にオー

バーハングするような浸潤状態となったことが特徴的である。とくにこの破堤部は、天端にアスファルト舗装が施されていないことから、降雨、越水による天端からの浸透は川表のり面からの浸透水を助長し、浸潤域を広げ脆弱な部位が拡大されたと推察できる。この浸潤状態におけるすべり破壊を考えると、表層で薄層となるもののすべり破壊を生じる可能性がある。また、脆弱域も裏のり付近に生じることから、局所的な崩壊の可能性もある。

⇒ これら検討結果から、破堤要因は越水による洗掘と浸透による堤体の脆弱性等が堤体表層部を脆弱化させ洗掘と同時にすべり破壊、崩落が発生し、これらが複合的に進行することにより破堤に至った可能性がある。

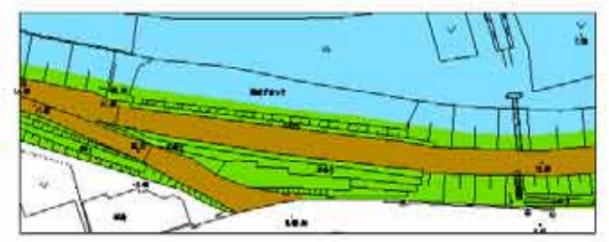
河川水流入(14:30 頃)

- ・ 応急復旧前の現場スケッチから、破堤は坂路を含むのり尻付近まで発生し、越水洗掘による落堀は堤脚から深度約 3m であったと推察できる。

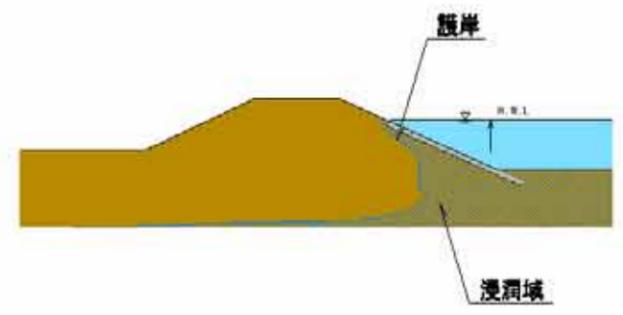
(5) 破堤部以外の越水区間の状況

左岸の越水区間においては、破堤箇所の特化した条件、状況は無いと考えられるが、破堤要因に関連する事項として越水区間を他の箇所と比較した場合、堤体が砂質土主体、堤防天端が未舗装であったことが挙げられる。地盤調査結果から、JR 北陸本線より上流は、堤体土質を砂質土主体として大別しているものの、過去の河道の変遷、築堤履歴、本調査における非破壊試験結果からも河川堤防盛土の不均質性が解る。この不均質性を考慮すると、破堤には至っていないものの堤体盛土が砂質土主体で天端にアスファルト舗装が施されていない区間は、越流により裏のり面に生じるせん断力が許容せん断力を大きく上回ることから洗掘が生じ、堤体地盤が砂質土主体であることから浸潤域が進行拡大し、さらに堤防天端が透水性を有するため、この越流により浸潤域が進行して裏のり面に脆弱域が広がることから、かなり危険な状態にあったと推察できる。

計画高水位到達 (10:30頃)

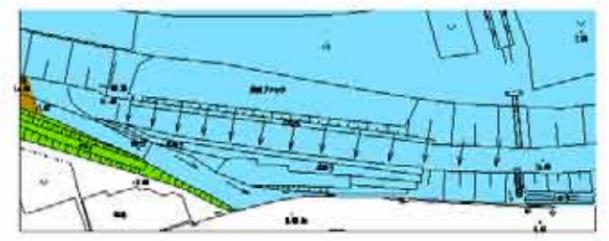


河川内水位が急上昇しH.W.L.に達する。

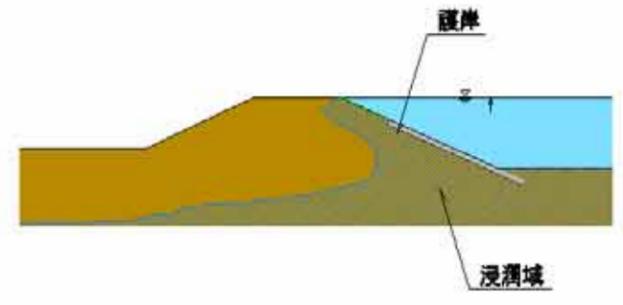


- 河道内侵食 : 流速2.0m/s以下 ... OK
 - 越水洗掘破壊 : -
 - 川表すべり破壊 : すべり安全率Fs \geq 1.0 ... OK
 - 川裏すべり破壊 : すべり安全率Fs \geq 1.0 ... OK
 - 脆弱域 : 脆弱域は出現しない。
- ⇒ 堤体は安全性を保持している。

越水開始 (12:15頃)



越水が開始。

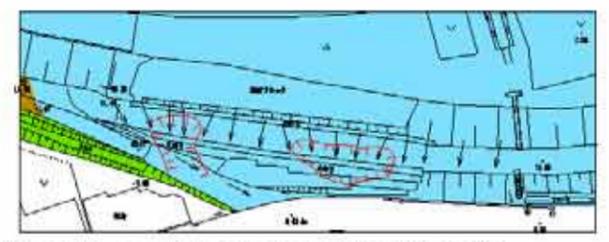


- 河道内侵食 : 計画高水位到達時と同じ
 - 越水洗掘破壊 : "
 - 川表すべり破壊 : "
 - 川裏すべり破壊 : "
 - 脆弱域 : "
- ⇒ 堤体は安全性を確保しているものの、浸潤域は拡大している。

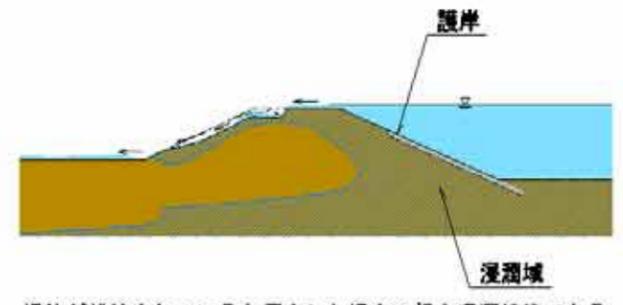
破堤時 (13:35~13:45頃)



(日刊県民福井 提供)



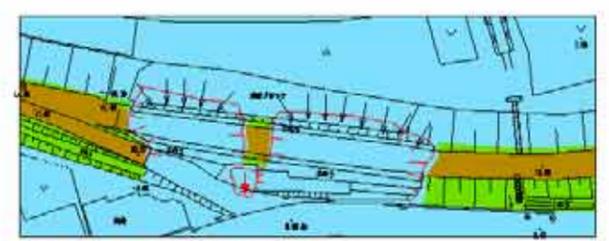
破堤区間上・下流端で天端裏のり肩から侵食が進む。



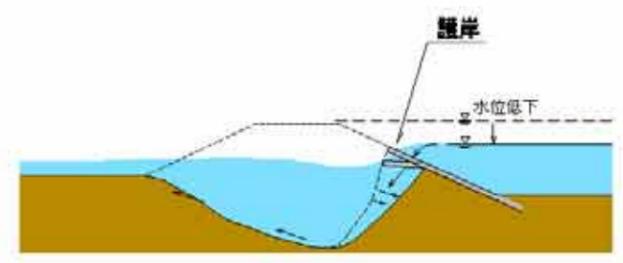
堤体が維持されていると仮定した場合の想定浸潤線等である。

- 河道内侵食 : 計画高水位到達時と同じ
 - 越水洗掘破壊 : 裏のり面、裏のり先で洗掘破壊が発生
 - 川表すべり破壊 : 計画高水位到達時と同じ
 - 川裏すべり破壊 : すべり安全率Fs \leq 1.0となる ... NG
 - 脆弱域 : 裏のり付近に発生
- ⇒ 越水により裏のり面に洗掘破壊が発生、同時に裏のり面表層付近に浸潤域が広がり、脆弱域が生じた可能性がある。

河川水流入 (14:30頃)



高水腹岸の裏まで洗掘が進み倒壊する。



上記の越水による洗掘破壊、浸透にともなう堤体の脆弱性が複合的に発生し、これらの破壊が進行して破堤に至った可能性がある。

図-3.3.15 足羽川における破堤進行状況想定図