

円山川堤防調査委員会

報告書

平成17年3月30日

豊岡河川国道事務所

< 目 次 >

1. 委員会の目的	p 1
1.1 目的	
1.2 委員の構成	
1.3 検討の経緯	
2. 台風 23 号出水の概要	p 3
2.1 気象概要	
2.2 被害の状況	
2.3 出水の分析	
2.3.1 降雨量	
2.3.2 流下能力	
2.3.3 越水区間	
2.3.4 洪水痕跡水位と堤防高さの縦断図	
3. 詳細調査	p 10
4. 破堤原因の特定	p 12
4.1 円山川右岸 13.2k 堤防	
4.2 出石川左岸 5.4k 堤防	
5. 沈下の現状	p 30
5.1 豊岡盆地の地盤沈下	
5.2 円山川左岸 9.6k と円山川右岸 13.2k における沈下予測	
6. 堤防強化・管理に関する対応方針について	p 34
7. 堤防強化の基本方針	p 35
7.1 越水現象の抑制 ～円山川緊急治水対策～	
7.2 浸透対策	
7.2.1 円山川右岸 13.2k (破堤) 地点の対策	
7.2.2 出石川左岸 5.4k (破堤) 地点の対策	
7.2.3 破堤地点以外の対策	
8. 堤防管理に関する強化のあり方	p 50
8.1 高さ管理システムの形成	
8.2 情報共有システムの形成	
8.3 その他の堤防管理における留意事項	
9. 平成 17 年度出水期までに実施する主な内容	p 55

あとがき

1. 委員会の目的

1.1 目的

平成16年10月20日大阪に上陸した台風23号は、円山川流域で2日雨量278mmの降雨をもたらした。この豪雨により円山川下流域の一市三町（豊岡市、城崎郡城崎町、日高町、出石郡出石町）では、死者5人、負傷者15人、全壊22戸、半壊一部損壊1,520戸、浸水家屋10,332戸、浸水面積4,083haに達する甚大な被害が発生した。

また、この豪雨により立野水位観測所では観測開始以降、最高水位を記録し、円山川、出石川等の国土交通省管理区間において25箇所の越水が発生、円山川、出石川のそれぞれで1箇所が破堤し甚大な被害となった。

このような甚大な被害に鑑み、破堤の原因究明と再度の破堤被害の回避に資する目的で、「円山川堤防調査委員会」を設置した。

1.2 委員の構成

委員は以下のとおりである。

表-1.1 円山川堤防調査委員会 委員構成

氏名	所属等	備考
宇野 尚雄	広島工業大学教授（岐阜大学名誉教授）	委員長
末次 忠司	国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室室長	
中川	京都大学防災研究所災害観測実験センター教授	
藤田 裕一郎	岐阜大学流域圏科学研究センター教授	副委員長
三木 博史	独立行政法人上木研究所技術推進本部本部長	

1.3 検討の経緯

本委員会では、表-1.2に示す議事内容で計4回の審議を行った。第2回までは、出水の状況、分析、ならびに破堤状況、ヒアリング結果などを中心に進めた。第3回では、調査ボーリング結果と、これに基づいた浸透・安定性解析、洪水流の解析、破堤原因の特定、対策工について基本的方針について検討を行っている。第4回では、堤防強化の基本方針、堤防管理に関する強化のあり方、平成17年度出水期までに実施する内容について審議を行った。

表-1.2 委員会の議事内容

回数	開催日	議事内容
1	平成 16 年 10 月 29 日	<p>1-1. 出水概要 (気象概況、降雨の状況、水位の状況、被害の状況)</p> <p>1-2. 破堤箇所の概要 (治水地形分類・地盤の土質、破堤・欠損部分の状況、築堤履歴、ヒアリング)</p> <p>1-3. 土質調査の項目 (現時点までに実施した項目、今後の調査項目)</p> <p>1-4. 現時点までに確認した事項</p> <p>1-5. その他の被災箇所</p>
2	平成 16 年 11 月 23 日	<p>2-1. 台風 23 号出水の分析 (雨量評価、流量評価、痕跡調査による越水区間、洪水痕跡水位と測量成果、流下能力、住民ヒアリングの結果)</p> <p>2-2. 円山川の地盤 (地質縦断図、広域な地盤沈下、地盤沈下の経年変化)</p> <p>2-3. 堤防の現状 (堤防履歴、堤防高管理の内容、浸透に対する堤防の安全性評価の手順、堤防点検結果)</p> <p>2-4. 堤防の調査について (堤防詳細点検、地点選定、調査内容、円山川右岸 13. 2k、シミュレーションモデル、解析断面のモデル化)</p> <p>2-5. 次回までに整理する事項</p> <p>2-6. 委員会の今後の予定</p>
3	平成 16 年 12 月 24 日	<p>3-1. 破堤原因の特定 円山川右岸 13. 2k 地点 (破堤箇所の測量結果、破堤箇所の土質調査結果、破堤箇所の解析、堤体断面変化と局所安全率の関係、破堤のイメージ、まとめ) 出石川左岸 5. 4k 地点 (破堤箇所の測量結果、破堤箇所の土質調査結果、破堤箇所の解析、堤体断面変化と局所安全率の関係、洪水流の解析 (平面二次元不定流解析)、破堤のイメージ、まとめ)</p> <p>3-2. 円山川の地盤特性 (基礎地盤の土質調査結果、土質の物性値、現在までの築堤履歴に伴う沈下予測結果、将来の完成堤の築堤に伴う沈下予測結果、沈下解析の結果)</p> <p>3-3. 対策の方針</p>
4	平成 17 年 1 月 29 日	<p>4-0. 堤防強化・管理に関する対応方針について</p> <p>4-1. 堤防強化の基本方針 越水現象の抑制 ～円山川緊急治水対策～ 浸透対策 円山川右岸 13. 2k (破堤) 地点の対策 出石川左岸 5. 4k (破堤) 地点の対策 破堤地点以外の対策</p> <p>4-2. 堤防管理に関する強化のあり方 高さ管理システムの形成 情報共有システムの形成 その他の堤防管理における留意事項</p> <p>4-3. 平成 17 年度出水期までに実施する内容</p>

2. 台風 23 号による出水の概要

2.1 気象概要

10月13日9時にマリアナ諸島近海で発生した台風23号は、18日9時に超大型で強い勢力となって沖縄の南海上を北上した。台風は、19日に沖縄本島から奄美諸島沿いに進み、20日13時頃、大型の強い勢力で高知県上佐清水市付近に上陸した後、20日18時前、大阪府泉佐野市付近に再上陸した。その後、東日本を横断して21日9時に関東の東海上で温帯低気圧となった。

台風と前線の影響による総降水量は、四国地方や大分県で500mmを超えたほか、近畿北部や東海、甲信地方で300mmを超え、広い範囲で大雨となった。

特に、台風が西日本に上陸した20日は、九州地方から関東地方にかけての多くの地点で、これまでの日降水量の記録を上回る大雨となった。

円山川流域の降雨状況は2日間(19～20日)では立野上流域で278mm、弘原上流域で317mmが確認された。

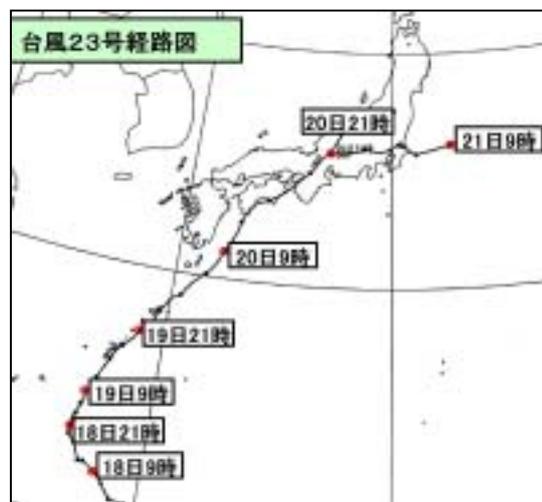


図-2.1.1 台風 23 号経路図

2.2 被害の状況

台風 23 号による円山川流域の主な被災状況を図-2.2.1 に示す。

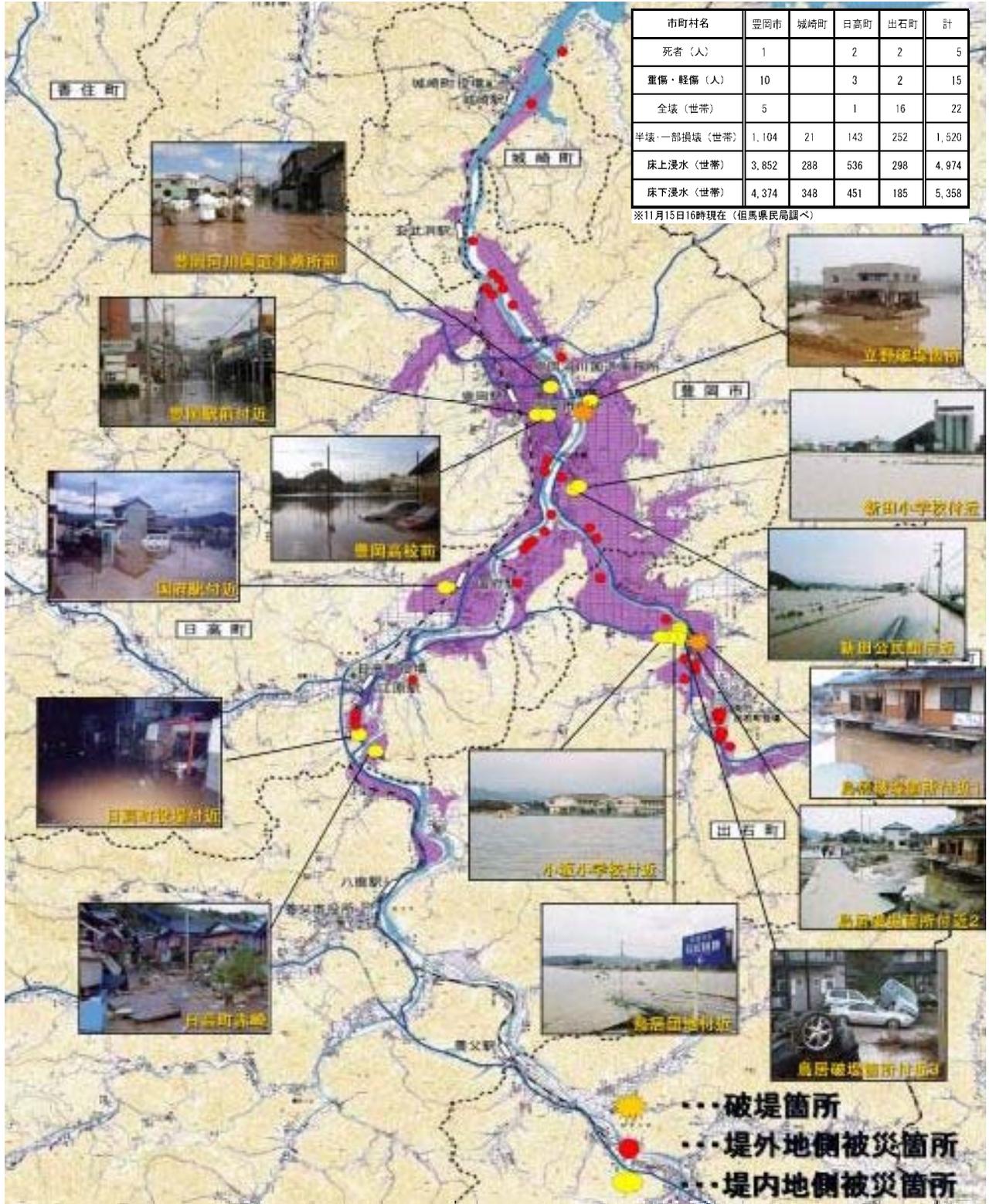


図-2.2.1 主な被災位置図

2.3 出水の分析

2.3.1 降雨量

円山川立野上流域の計画降雨量が2日雨量で327mm（100年に一度の確率雨量）であるのに対して、今回の23号台風時には2日間で278mm（約40年に一度の確率雨量）、24時間で242mm（約60年に一度の確率雨量）、12時間で206mm（約80年に一度の確率雨量）の降雨量となった。

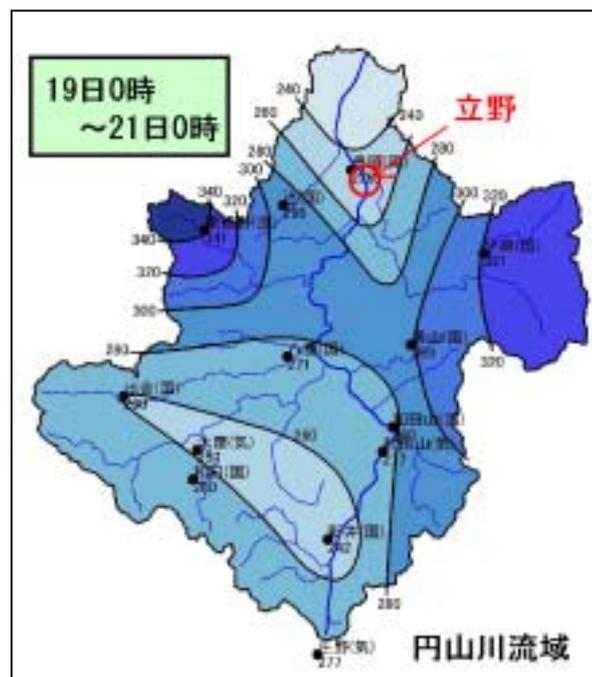


図-2.3.1 円山川流域の2日雨量

2.3.2 流下能力

円山川の立野水位観測所では流下能力が $3,900\text{m}^3/\text{s}$ であるのに対して、実績流量が $4,200\text{m}^3/\text{s}$ と推定された。

また、出石川の引原水位観測所では流下能力が $800\text{m}^3/\text{s}$ であるのに対して、実績流量が $1,000\text{m}^3/\text{s}$ と推定された。

表-2.3.1 各地点の流下能力と実績流量について

地 点	流下能力 (m^3/s)	H-Q 式換算 実績流量 (m^3/s)	氾濫戻し流量 (m^3/s)
立野 (円山川 13.0k)	3900	4200	4900
引原 (出石川 7.6k)	800	1000	1000

2.3.3 越水区間

痕跡調査による越水区間を以下に示す。越水箇所の延長および箇所数は有堤区間の堤防に対して次のようであった。

- ・円山川堤防では、左岸9区間（1,480m、全体の約5%）、右岸5区間（1,550m、同約6%）の計14区間。
- ・出石川堤防では、左岸5区間（830m、同約10%）、右岸6区間（3,510m、同約35%）の計11区間

なおこれだけの越水がみられたのに対し、破堤は2箇所であったことは、越水に対する円山川堤防の耐越水能力がかなり保持されていたことを示すと考えられ、天端や裏法面の張り芝工の抵抗力が寄与したものと考えられる。



図-2.3.2 痕跡調査による越水区間（円山川 1/2）



図-2.3.3 痕跡調査による越水区間（円山川 2/2）



図-2.3.4 痕跡調査による越水区間（出石川）

2.3.4 洪水痕跡水位と堤防高さの縦断図

出水後に測量した痕跡水位と堤防高さは次のとおり。

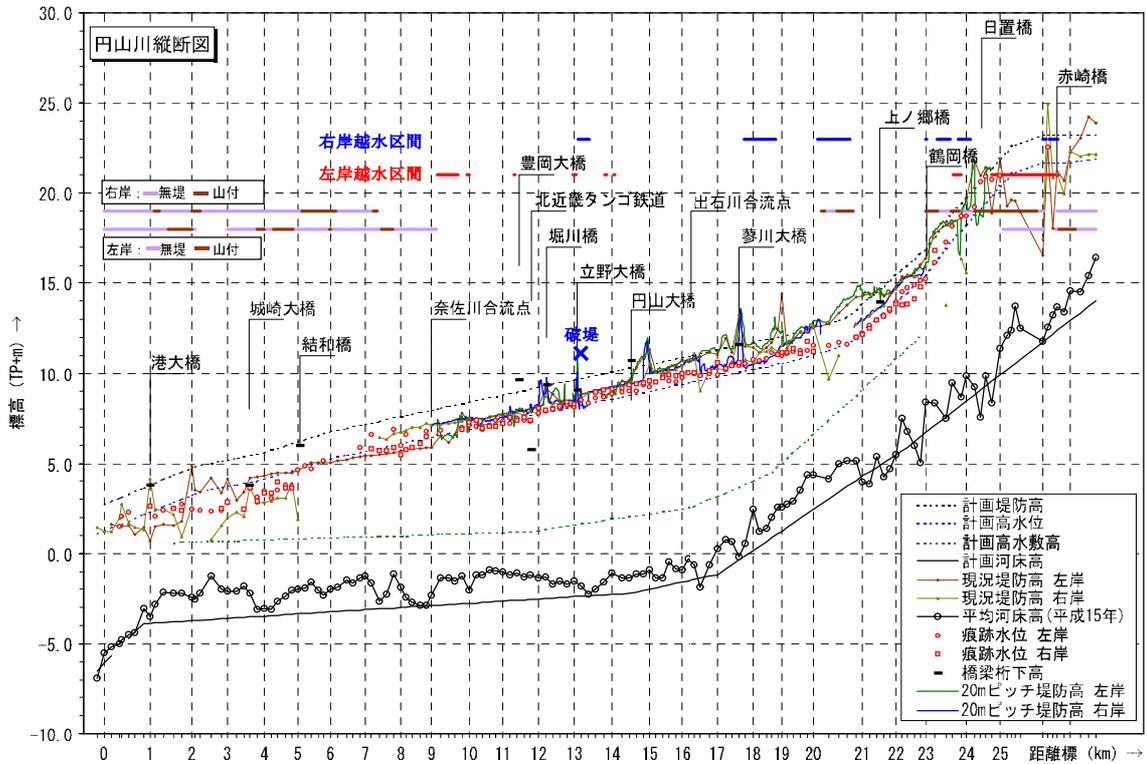


図-2.3.5 洪水痕跡水位と堤防高の縦断図（円山川）

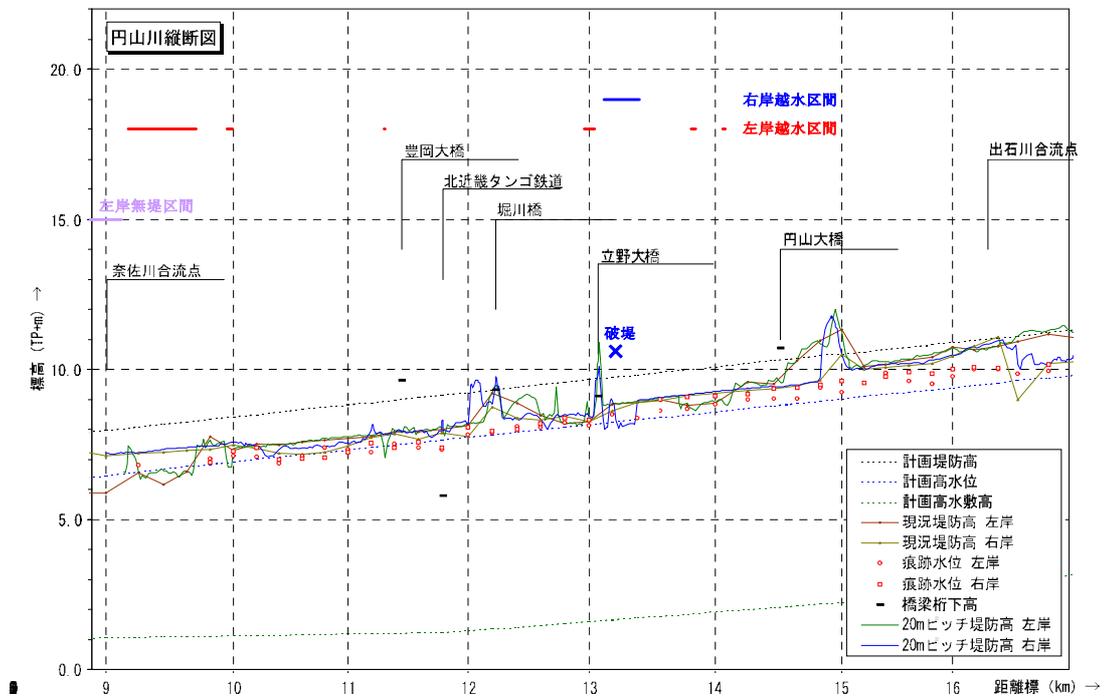


図-2.3.6 洪水痕跡水位と堤防高の縦断図（円山川 9 km～17 km）

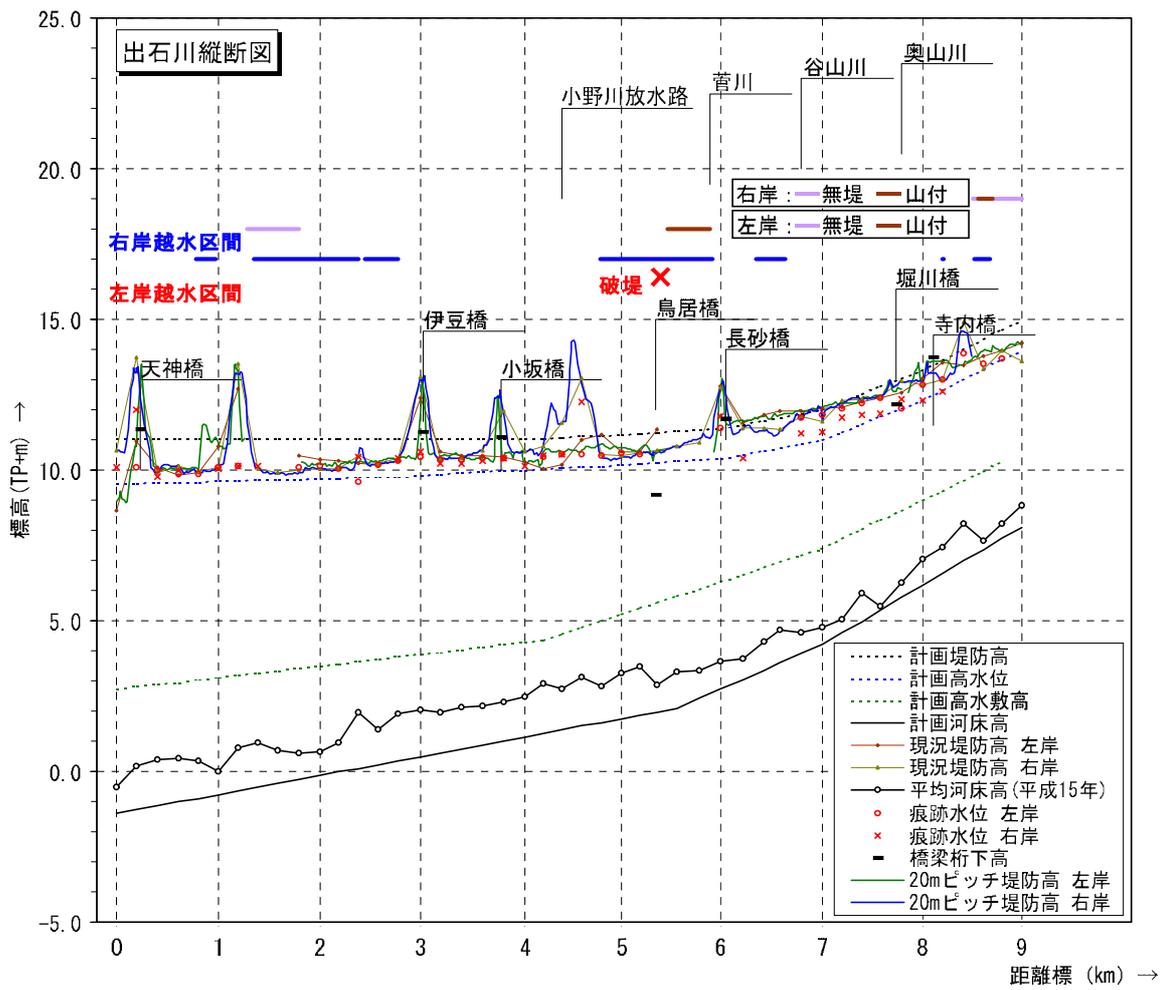


図-2.3.7 洪水痕跡水位と堤防高の縦断図（出石川）

図-3.1.2 に具体的な調査内容を示す。「詳細調査断面」では調査結果を用いて、図-3.1.3 に示すフローに沿った浸透流および安定解析を実施し、浸透に対する堤防の安全性を評価した。

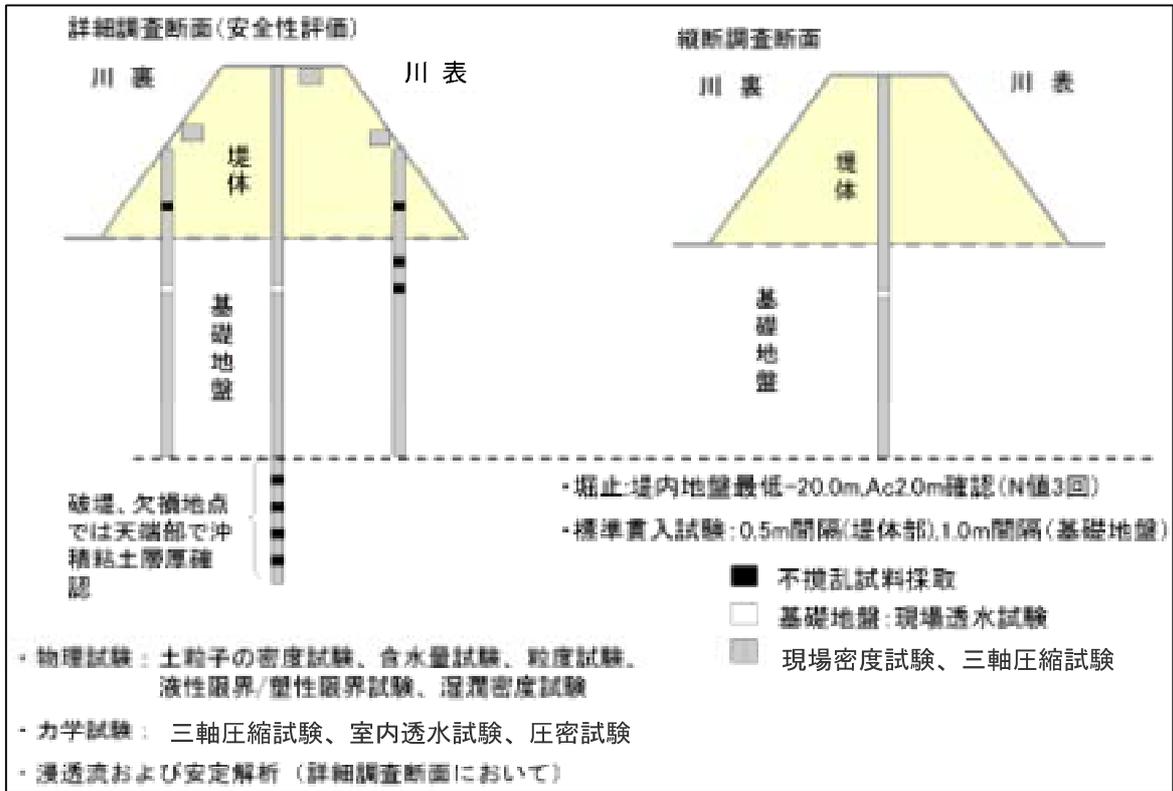


図-3.1.2 調査内容

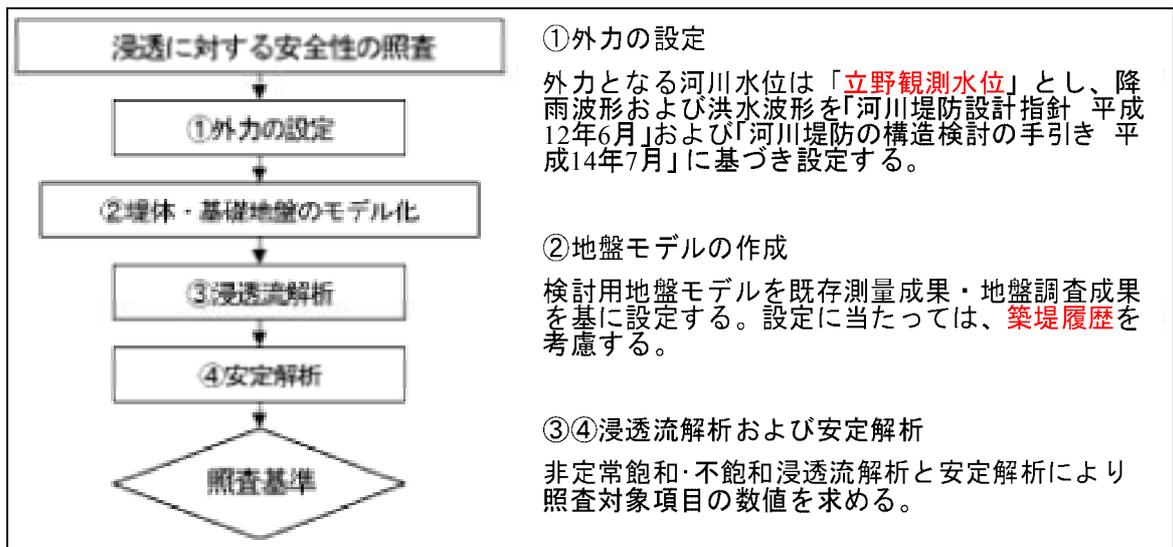


図-3.1.3 シミュレーションモデル

4. 破堤原因の特定

4.1 円山川右岸 13.2k 堤防

(1) 土質調査

ボーリング調査は、破堤箇所を挟むように上流と下流に分けて実施した。ボーリング調査の結果、破堤箇所付近の地層構成は図-4.1.2のように推定される。ここで、地層境界線の推定は、堤防施工履歴を考慮に入れて行っている。

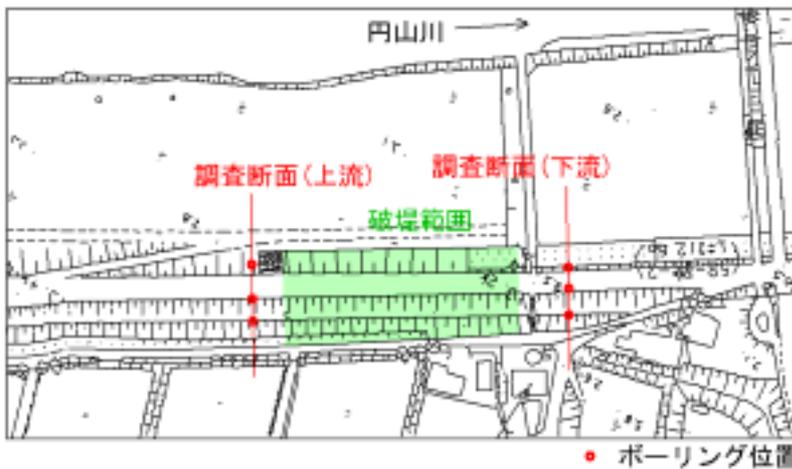
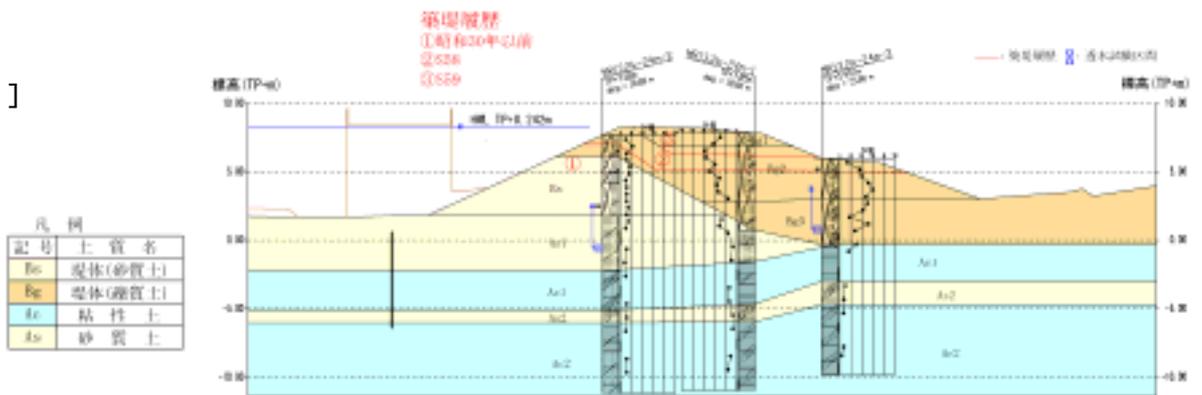


図-4.1.1 調査位置平面図



調査地（上流側上空より）

[下流]



[上流]

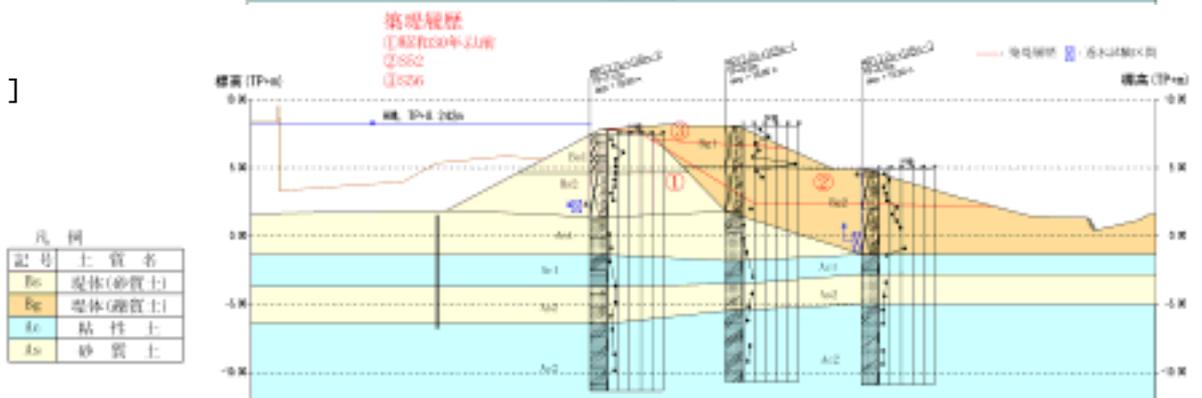


図-4.1.2 推定土質断面図

(2) 浸透流解析とのり面安定解析

ボーリング調査・室内試験結果をもとに設定した土質定数を下表に示す。

表-4.1.1 土質定数

[下流]		地質分類	土質	記号	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	飽和透水係数 (cm/sec)
堤体	砂質土	Bs	19	0	31	6.6E-04		
	礫質土	Bg1	21	0	37	7.1E-04		
	礫質土	Bg2	18	0	36	1.5E-03		
	礫質土	Bg3	20	47	30	5.7E-03		
基礎地盤	粘性土	Ac1	18	68	0	1.0E-06		
	粘性土	Ac2	16	69	0	1.0E-06		
	砂質土	As1	18	22	24	1.6E-03		
	砂質土	As2	17	0	28	1.2E-05		

[上流]		地質分類	土質	記号	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	飽和透水係数 (cm/sec)
堤体	砂質土	Bs1	19	0	33	4.0E-05		
	砂質土	Bs2	17	34	26	2.9E-03		
	礫質土	Bg1	18	0	35	1.0E-02		
	礫質土	Bg2	20	14	36	1.6E-05		
基礎地盤	粘性土	Ac1	17	59	0	1.0E-06		
	粘性土	Ac2	17	70	0	1.0E-06		
	砂質土	As1	18	0	23	1.0E-04		
	砂質土	As2	17	0	29	3.3E-05		

設定外力条件は以下のとおりである。設定外力を図-4.1.3に示す、

- ・ 内水位は、現況ポンプ運転を行った場合の水位（外水氾濫なし）
- ・ 外水位は、現況河道に氾濫もどし流量を流した場合の水位
- ・ 降雨量は、立野上流域平均降雨量

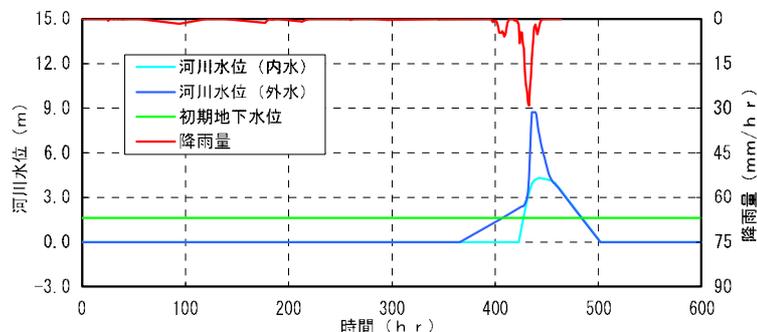


図-4.1.3 外力波形（河川水位・降雨）

解析結果を表-4.1.2に示す。表のり・裏のりのすべりおよびパイピング破壊に対する安全率はいずれも確保されている。

表-4.1.2 浸透に対する安全度照査結果

照査項目		照査基準値	破堤直後の照査結果	判定	追加調査の照査結果	判定	
下流	すべり破壊に対する安全性	表のり	1.0以上	1.27	○	1.13	○
		裏のり	1.5以上	2.82	○	3.12	○
	パイピング破壊に対する安全性 (局所動水勾配)	鉛直方向	0.5未満	-1.12	○	-0.02	○
		水平方向	0.5未満	0.06	○	-0.01	○
上流	すべり破壊に対する安全性	表のり	1.0以上	1.50	○	1.29	○
		裏のり	1.5以上	1.90	○	2.21	○
	パイピング破壊に対する安全性(盤ぶくれ)	1.0以上	1.75	○	2.26	○	

[下流]

・解析結果（浸潤面図）

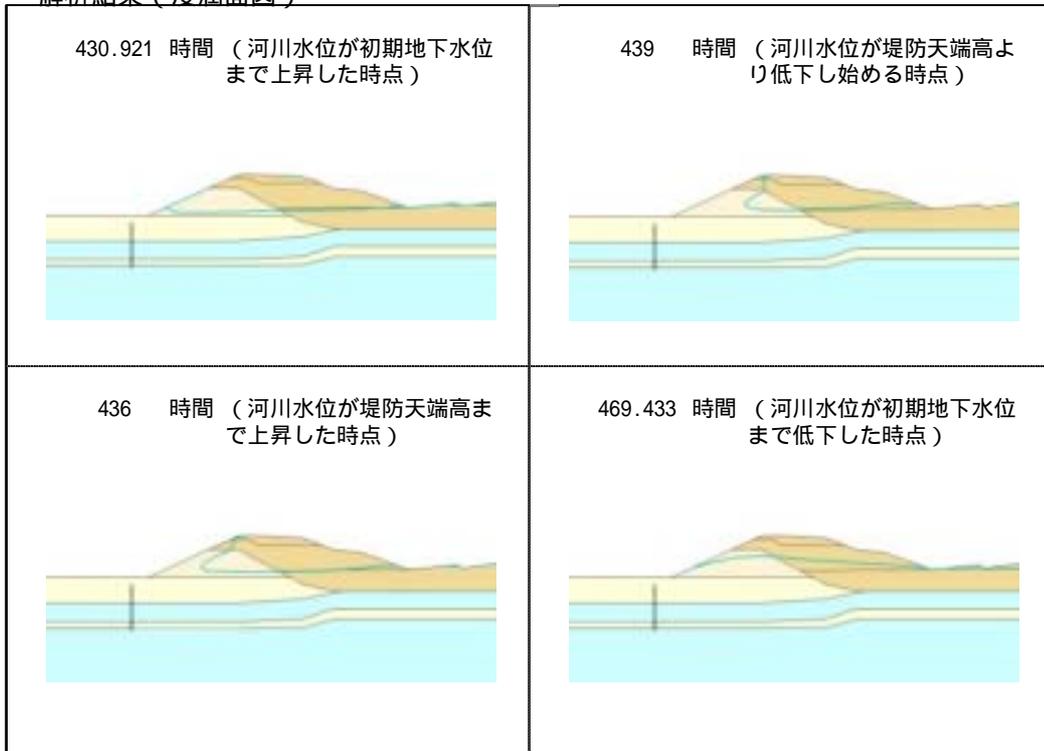


図-4.1.4 解析結果（浸潤面図）

・解析結果（安定計算結果図）

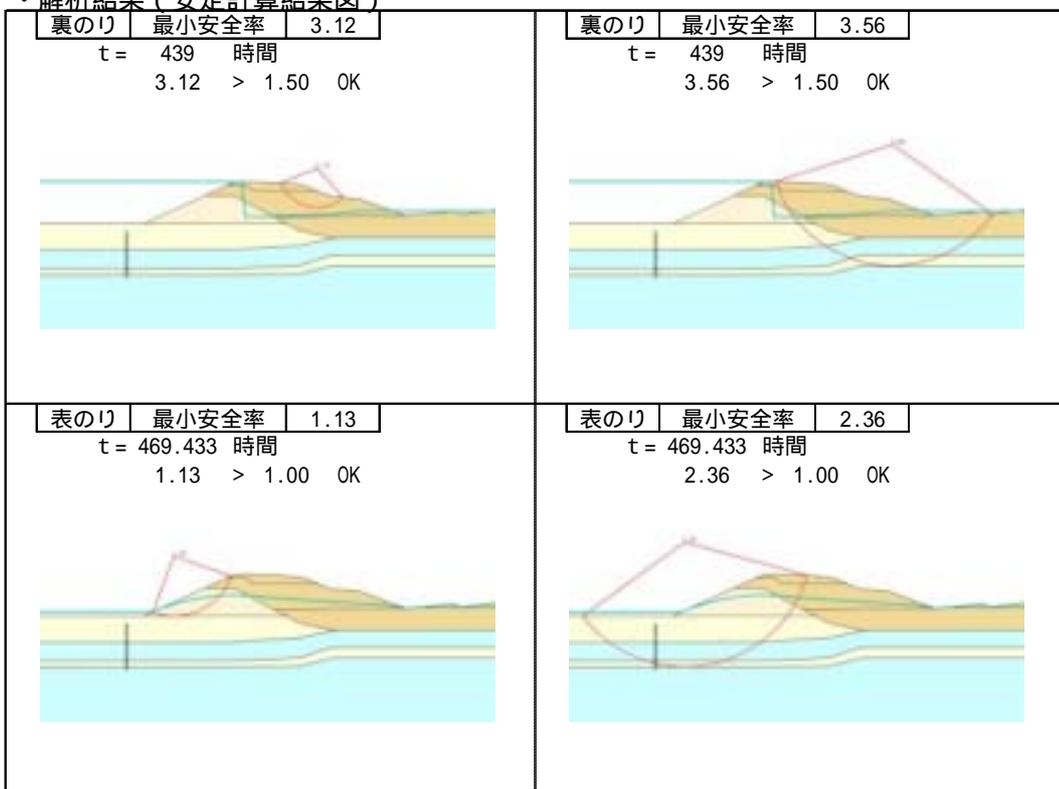


図-4.1.5 解析結果（安定計算結果図）

[上流]

・解析結果（浸潤面図）

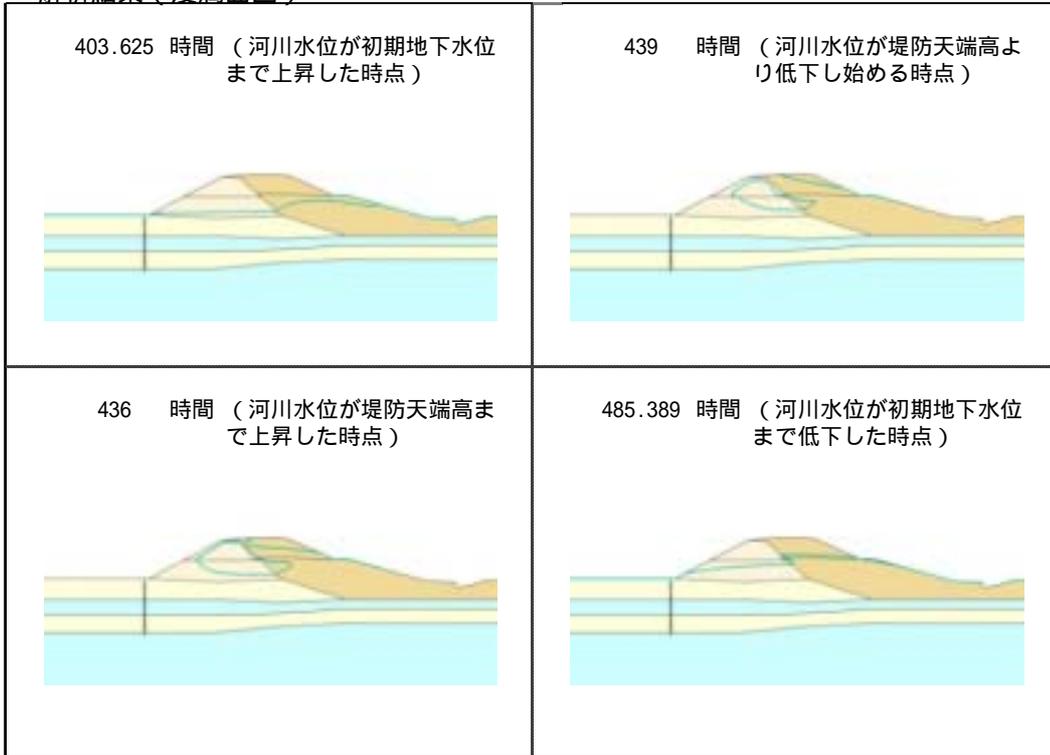


図-4.1.6 解析結果（浸潤面図）

・解析結果（安定計算結果図）

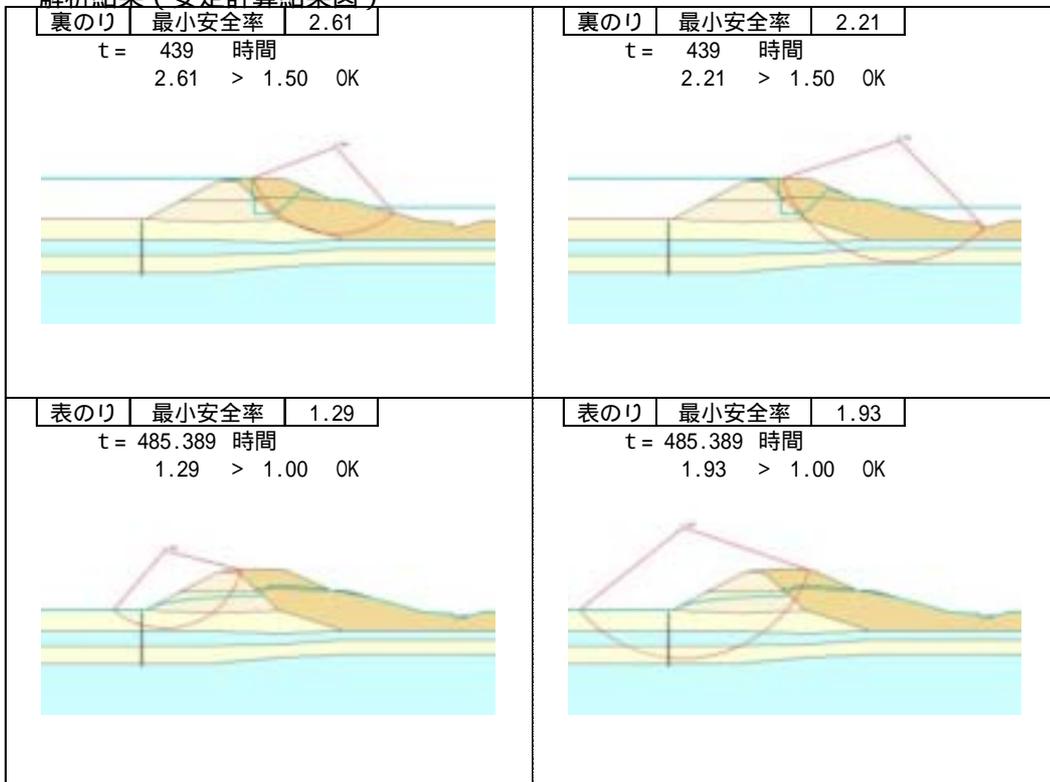


図-4.1.7 解析結果（安定計算結果図）

(3) 堤体断面変化と局所安全率

越水により堤体裏のり部が洗掘崩壊した場合、斜面安定解析の安全率がどう変化するかを検討した。検討条件は以下のとおりである。

- ・ 検討断面：上下流断面と堤防施工履歴より 13.2k+30m 付近の断面を推定

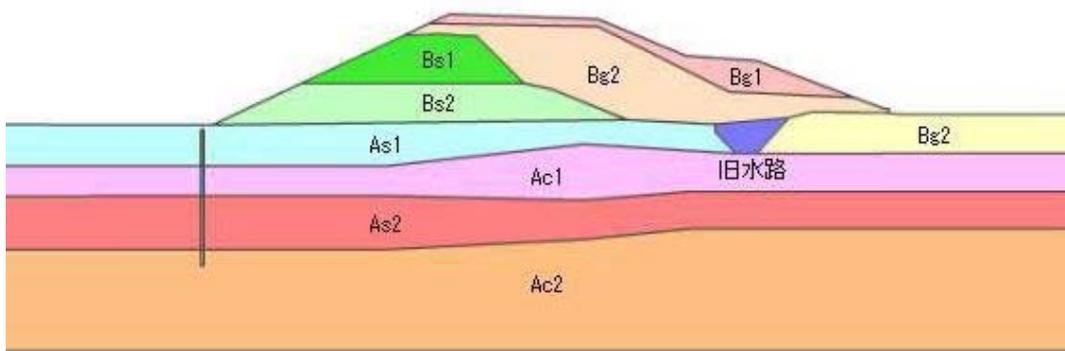


図-4.1.8 検討断面図

- ・ 検討水位：斜面安定解析時の水位は浸透流解析により求めた最大水位とした。
- ・ 土質定数：上流断面と同様、旧水路部の調査結果を考慮

表-4.1.3 土質定数一覧表

地質分類	土質	記号	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	飽和透水係数 (cm/sec)
堤体	砂質土	Bs1	19	0	33	4.0E-05
	砂質土	Bs2	17	34	26	2.9E-03
	礫質土	Bg1	18	0	35	1.0E-02
	礫質土	Bg2	20	14	36	1.6E-05
	礫質土	旧水路	20	0	29	1.0E-03
基礎地盤	粘性土	Ac1	17	59	0	1.0E-06
	粘性土	Ac2	17	70	0	1.0E-06
	砂質土	As1	18	0	23	1.0E-04
	砂質土	As2	17	0	29	3.3E-05

- ・ 検討方法：堤体の形状は、表のり天端から 1m の位置で固定し、その位置から裏のり側の法尻の位置を変化させて繰り返し計算した。

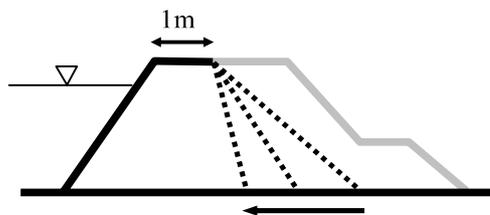


図-4.1.9 検討概要図

・斜面安定計算

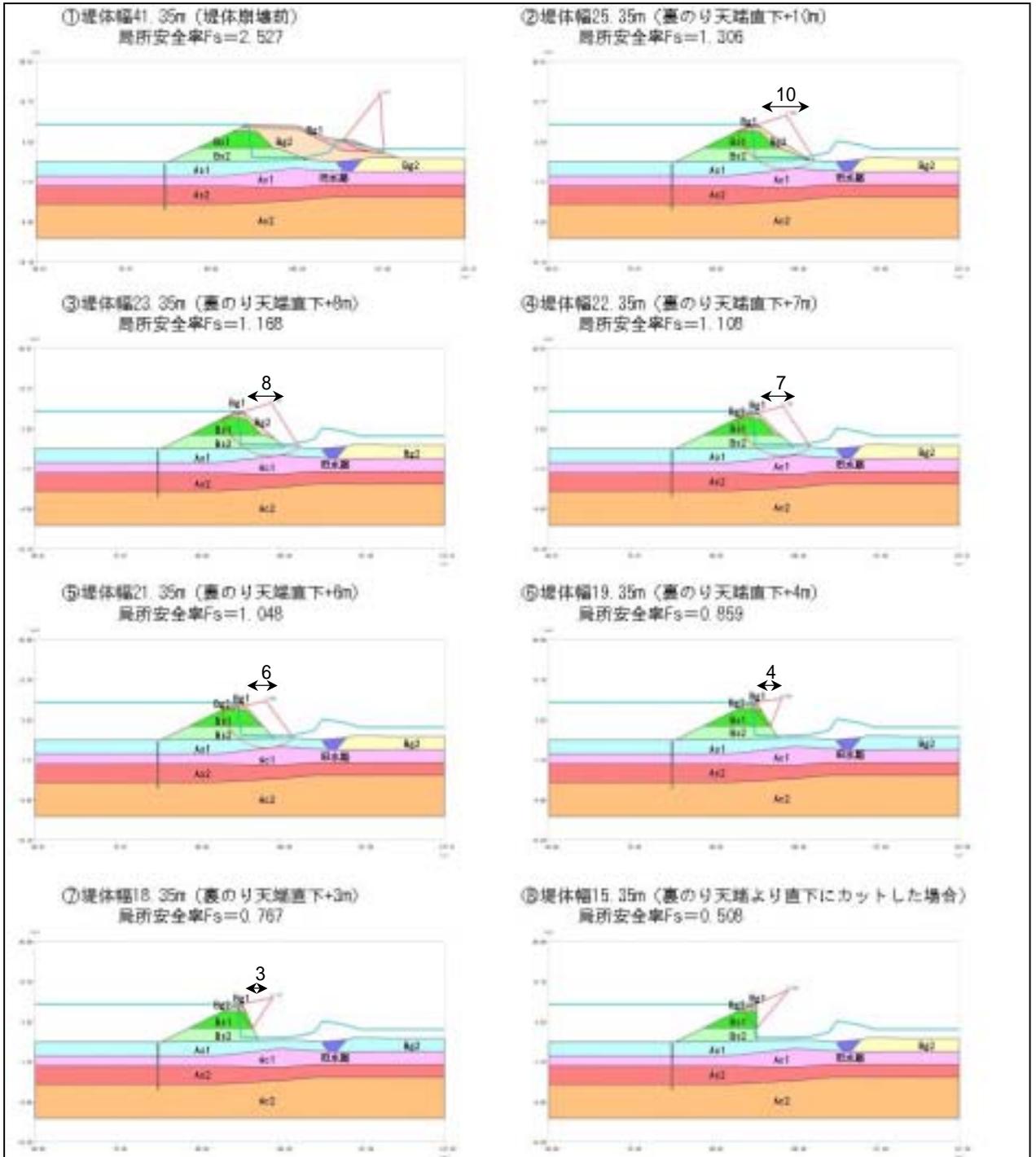


図-4.1.10 斜面安定計算図

・ 検討結果

図-4.1.12 に示すように、堤体幅の減少に伴って安全率が徐々に低下した。 堤体幅比率 0.85 の状態で局所安全率は 1.5 以下となる。

- ・ 堤体幅：表のりと裏法の法尻の距離
- ・ 堤体幅比率 = 残存堤体幅 / 崩壊前の堤体

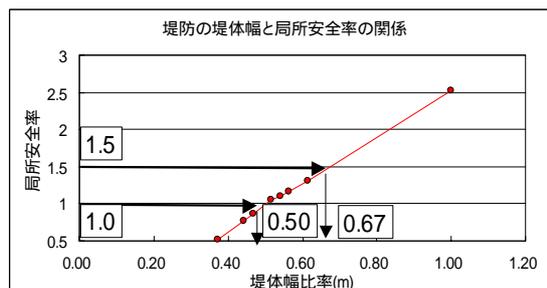


図-4.1.11 局所安全率と堤体幅比率の関係

(4) 越流による堤防裏のり面崩壊の評価

破堤地点を挟んだ上下流断面における断面勾配と、裏のり面が芝の場合の許容せん断力を図-4.1.12 に示す。

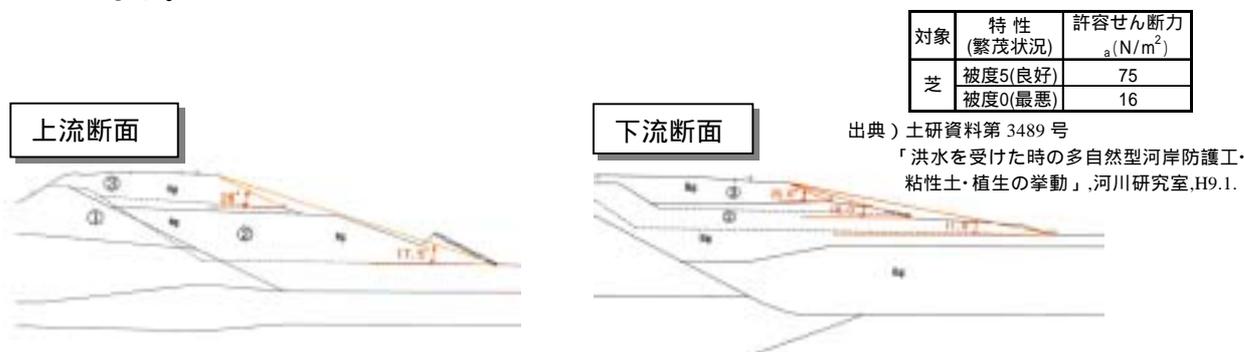


図-4.1.12 上下流の断面勾配と許容せん断力

- ・ ヒアリング結果による越流水深 (=0.4m) から、裏のり面に作用するせん断力 τ_0 は、上流断面で 390N/m²、下流断面で 380N/m² となり、良好な繁茂状況の芝の許容せん断力 τ_a (=75 N/m²) を大きく上回る。
- ・ 法先での洗掘や侵食も破堤を助長した可能性があるが、越水による裏のり面での侵食力が大きく許容値を上回っており、越流水により堤防裏のり面において侵食・洗掘破壊が生じた可能性が高い。

(5) 破堤箇所の測量「落堀」

越水区間で破堤した後に形成された落堀について、その大きさ・深さを測量した。

- ・ 破堤後に形成された落堀は、幅約 45m、長さ約 54m、最大深さは 4.3m であった。
(深さ=堤内地盤高-洗堀深)
- ・ 最深部を含む横断では、比高（天端高-地盤高）6.9m に対して、落堀の深さは 4.3m。
- ・ 堤内地盤高は、落堀周辺の任意の 13 点から算出した平均値 TP+1.16m

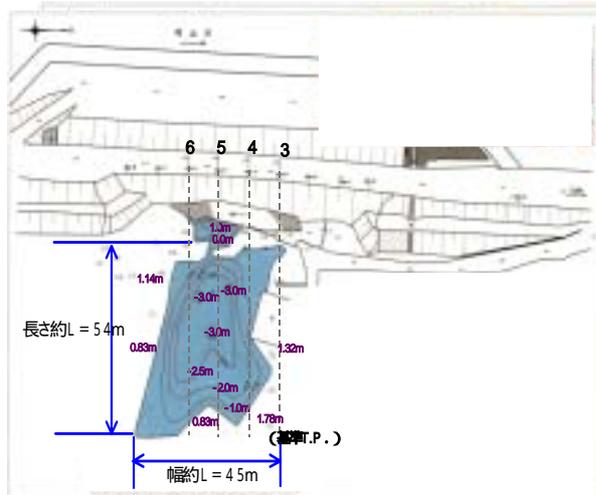


図-4.1.13 落堀の平面図

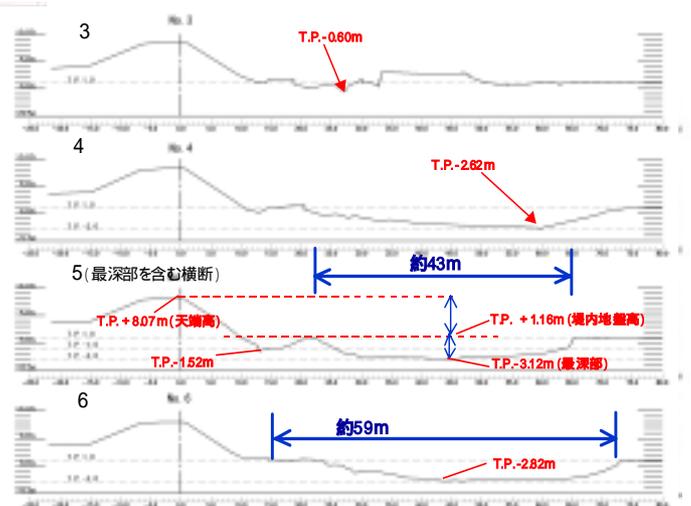
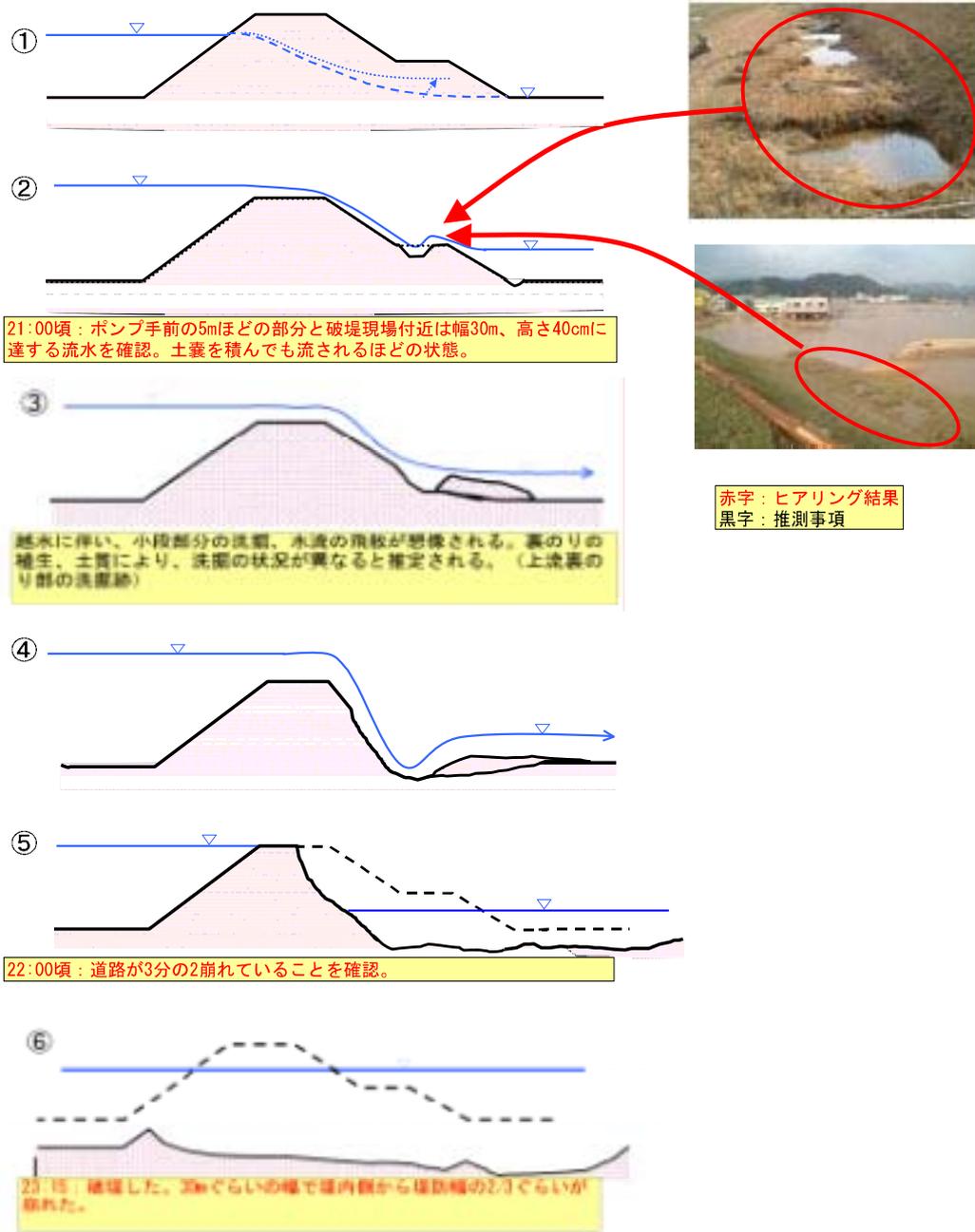


図-4.1.14 落堀の横断面図

(6) 破堤のイメージ



(7) 破堤原因の特定(円山川右岸 13.2k 堤防)

「越流による裏のり面侵食」後に「浸透」が加わる複合的要因により破堤したものと推定される。この地点の堤防法線は直線形状であるが、堤防・河道等が完成していないため、計画高水流量以下の洪水で越流して裏のり面（小段も含む）が侵食し、これに浸透が加わり破堤したものと推測される。

4.2 出石川左岸 5.4k 堤防

(1) 土質調査

ボーリング調査は、破堤箇所の下流で実施した。ボーリング調査の結果、破堤箇所付近の地層構成は図-4.2.2のように推定される。ここで、地層境界線は、堤防施工履歴を考慮して推定した。



●ボーリング調査位置
図-4.2.1 調査位置平面図



調査地（上流側上空より）

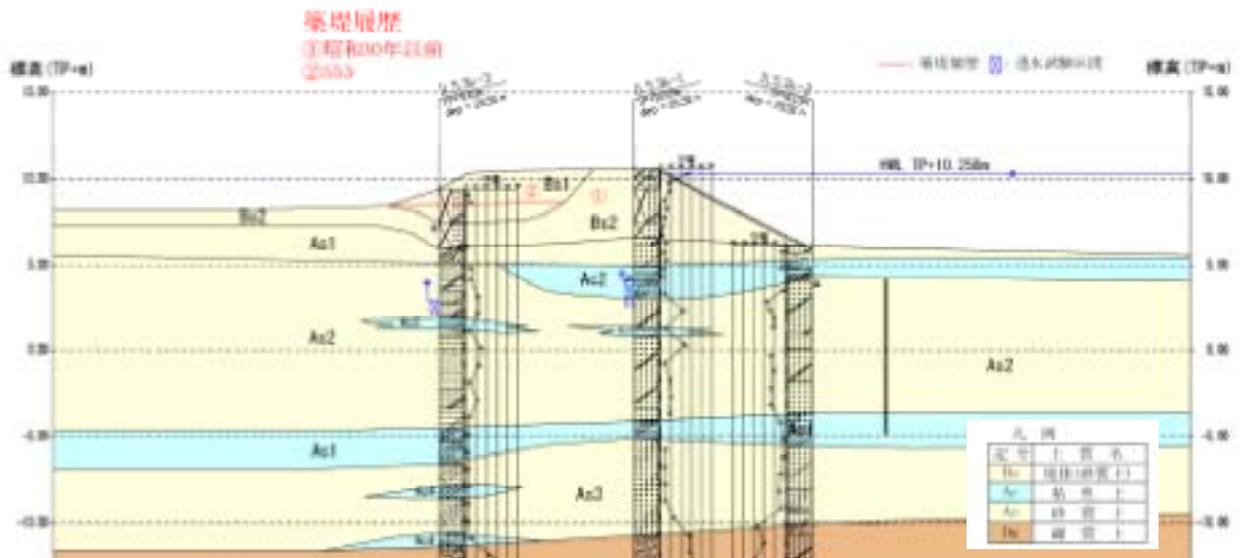


図-4.2.2 推定土質断面図

(2) 浸透流解析とのり面安定解析

ボーリング調査・室内試験結果をもとに設定した土質定数を下表に示す。

表-4.2.1 土質定数

地質分類	土質	記号	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	飽和透水係数 (cm/sec)
堤体	砂質土	Bs1	19	14	20	1.1E-03
	砂質土	Bs2	19	14	20	1.1E-03
基礎地盤	砂質土	As1	19	0	32	6.3E-05
	砂質土	As2	19	0	32	6.3E-05
	砂質土	As3	19	0	32	6.3E-05
	粘性土	Ac1	17	25	0	1.0E-06
	粘性土	Ac2	17	25	0	1.0E-06
	粘性土	Ac3	17	25	0	1.0E-06
	粘性土	Ac4	17	25	0	1.0E-06

設定外力条件は以下のとおりである。設定外力を図-4.2.3に示す、

- ・ 内水位はなし
- ・ 外水位は、平面二次元不定流解析による推定水位
- ・ 降雨量は、立野上流域平均降水量

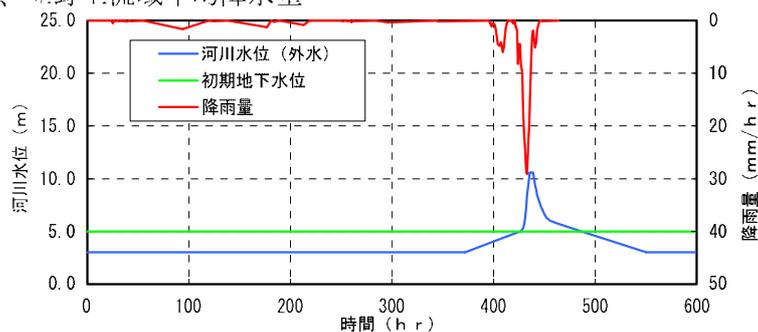


図-4.2.3 外力波形（河川水位・降雨）

解析結果を表-4.2.2に示す。表のり・裏のりのすべりおよびパイピング破壊に対する安全率はいずれも確保されている。

表-4.2.2 浸透に対する安全度照査結果

評価項目		照査基準値	照査の結果	判定
すべり破壊に対する安全率	表のり	1.0以上	1.49	○
	裏のり	1.5以上	3.55	○
パイピングに対する安全率 (局所動水勾配)	鉛直方向	0.5未満	-0.28	○
	水平方向	0.5未満	0.1	○

・解析結果（浸潤面図）

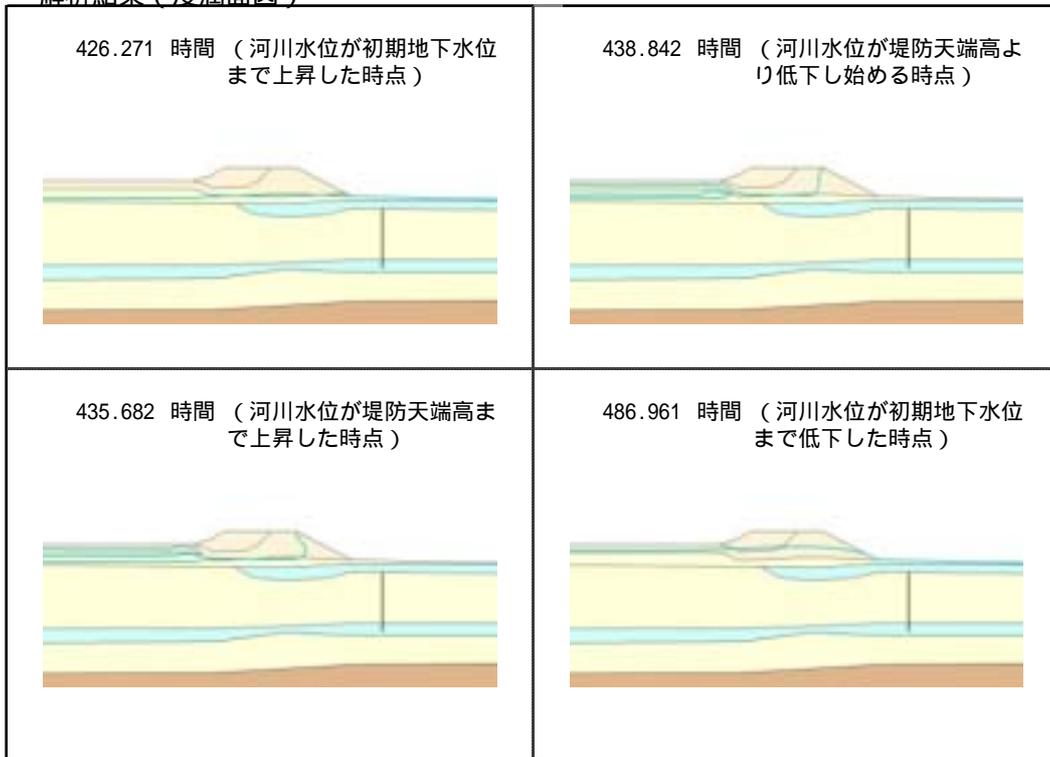


図-4.2.4 解析結果（浸潤面図）

・解析結果（安定計算結果図）

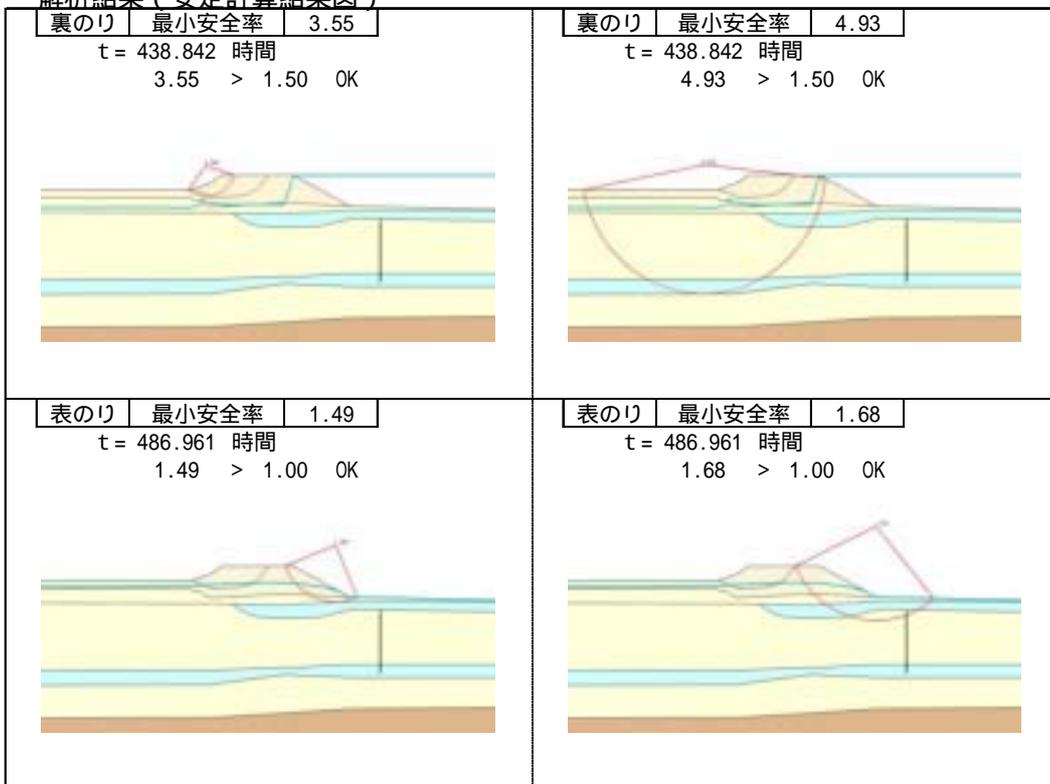


図-4.2.5 解析結果（安定計算結果図）

(3) 堤体断面変化と局所安全率

越水により堤体裏のり部が洗掘崩壊した場合、斜面安定解析の安全率がどう変化するかを検討した。検討条件は以下のとおりである。

- ・ 検討断面：浸透流解析断面と同様

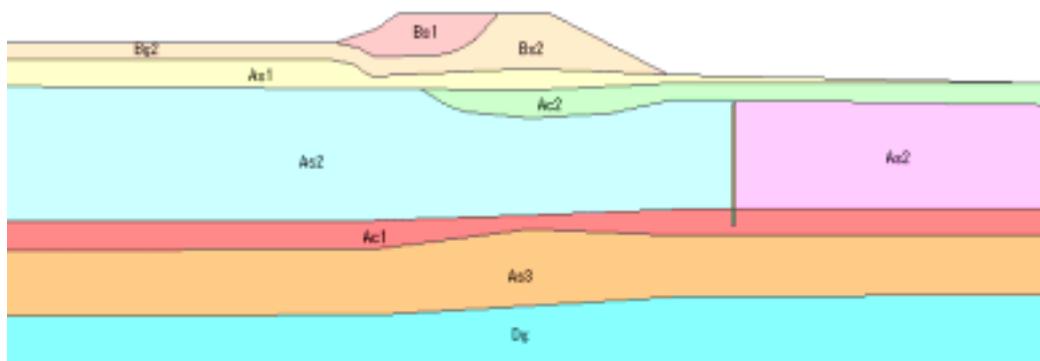


図-4.2.6 検討断面図

- ・ 検討水位：斜面安定解析時の水位は浸透流解析により求めた最大水位とした。
- ・ 土質定数：浸透流解析断面と同様

表-4.2.3 土質定数一覧表

地質分類	土質	記号	単位体積重量 t (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)	飽和透水係数 (cm/sec)
堤体	砂質土	Bs1	19	14	20	1.1E-03
	砂質土	Bs2	19	14	20	1.1E-03
基礎地盤	砂質土	As1	19	0	32	6.3E-05
	砂質土	As2	19	0	32	6.3E-05
	砂質土	As3	19	0	32	6.3E-05
	粘性土	Ac1	17	25	0	1.0E-06
	粘性土	Ac2	17	25	0	1.0E-06
	粘性土	Ac3	17	25	0	1.0E-06
	粘性土	Ac4	17	25	0	1.0E-06

- ・ 検討方法：堤体の形状は、表のり天端から 1m の位置で固定し、その位置から裏のり側の法尻の位置を変化させて繰返し計算した。

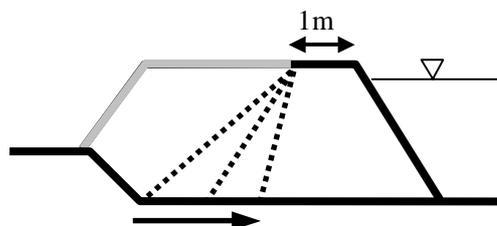


図-4.2.7 検討概要図

・ 斜面安定計算

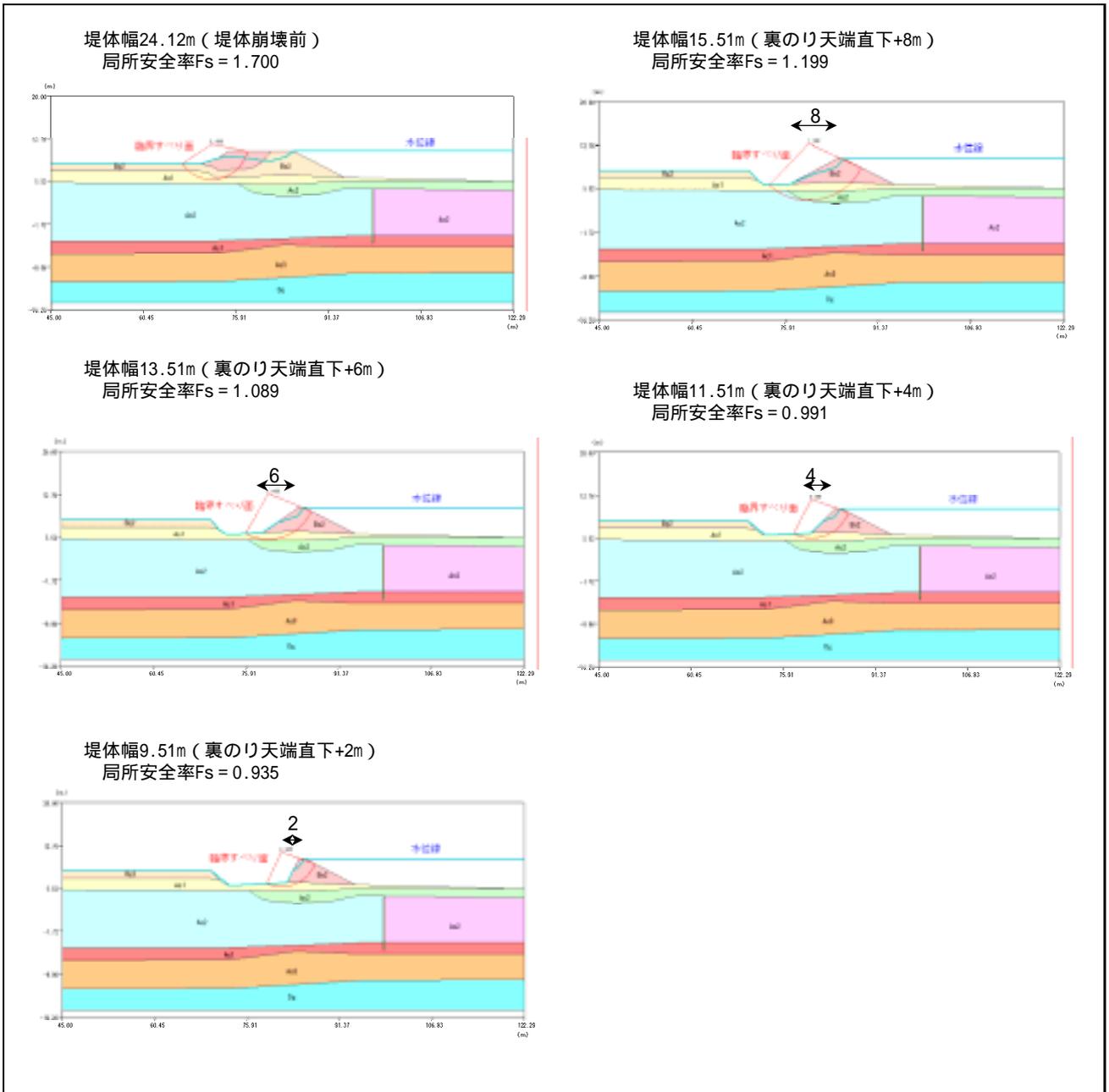


図-4.2.8 斜面安定計算図

・検討結果

図-4.2.9に示すように、堤体幅の減少に伴って安全率が徐々に低下した。

堤体幅比率0.86の状態では局所安全率は1.5以下となる。

- ・堤体幅：表のりと裏のりの法尻の距離
- ・堤体幅比率＝残存堤体幅／崩壊前の堤体

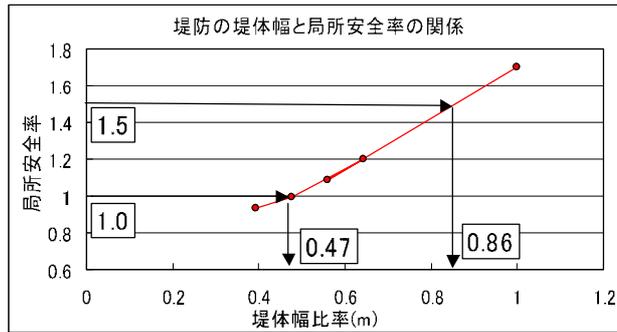


図-4.2.9 局所安全率と堤体幅比率の関係

(4) 洪水解析

破堤原因の解明を目的に、平面二次元不定流解析により河道上の平面的な流れの状況（流速・流向）や越流水深を再現し、越流による破堤危険度の評価を行った。

○破堤地点周辺の流況（流向・流速の解析結果）

- ・鳥居橋上流左岸（内岸）の高水敷上で流れが速くなる。
- ・鳥居橋のせき上げにより堤防上を越流した流れは、堤内地側へ流向を変えている。
- ・越流流速は、概ね 1.0～1.5m/s 程度、最大値は左岸で 1.7m/s、右岸で 1.9m/s となる。
- ・破堤地点の上流部では、通常低水路沿いを流れる洪水が、上流から直線的に流下し、左岸堤防の山付け部に集中している。

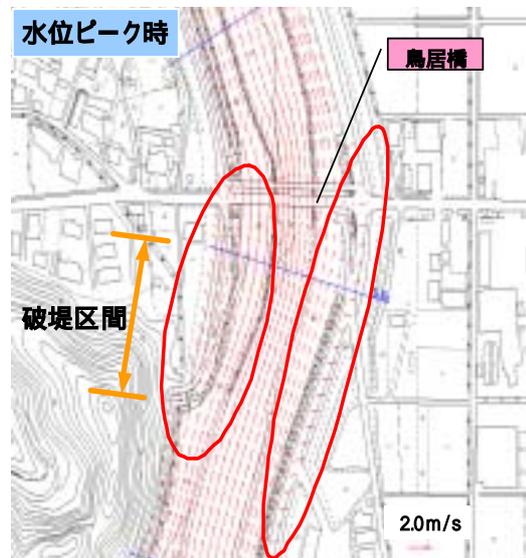


図-4.2.10 破堤地点周辺の流況

○破堤地点周辺の越流水深（解析結果）

- ・鳥居橋上流区間の越流水深は、概ね 30～40cm 程度である。
- ・最大越流水深は鳥居樋門地点で、約 50cm となった。
- ・これは水位上昇により、流れが左岸堤防の山付け部に集中したためと考えられる。

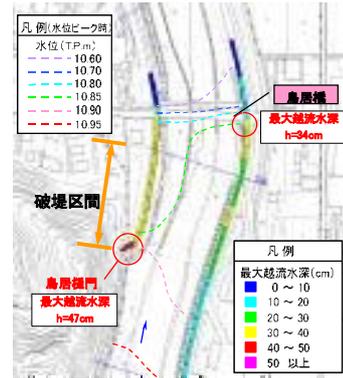


図-4.2.11 破堤地点周辺の流況

○越流による破堤危険度の評価（越流水深と越流時間）

- ・右図の最大越流水深と越流時間の関係から、鳥居橋上流の左岸（破堤あり）、右岸（破堤なし）の越流区間をみると、破堤した左岸の越流区間は破堤の危険度が高かったことがわかる。
- ・総点数 90 点のうち 68 点（75%）が破線より下になっている。

出典：土研資料 第2074号
「越流堤防調査最終報告書—解説編—」 S59.3

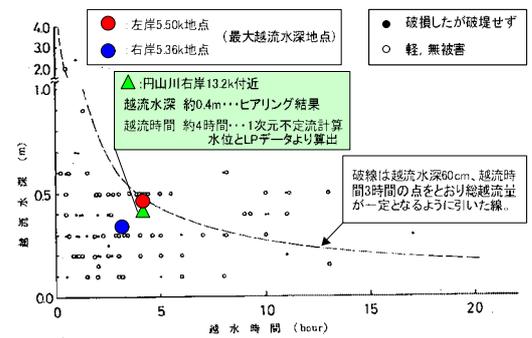


図-4.2.12 最大越流水深と越流時間の関係

○越流による破堤危険度の評価（天端掃流力と裏のり面せん断力）

- ・通常、土砂は掃流力 τ_* （摩擦速度 u_* ）がある限界値（ τ_{*c} ：無次元限界掃流力、 u_{*c} ：限界摩擦速度）を超えると移動が始まる。
- ・図-4.2.13より、越流区間の代表粒径 d に対する摩擦速度 u_* の関係は、大きく限界値を上回っており、堤体材料の上砂が流出した可能性が高い。
- ・左岸天端は未舗装であったが、右岸天端は舗装されていたため、堤体材料の流出を防いだと考えられる。

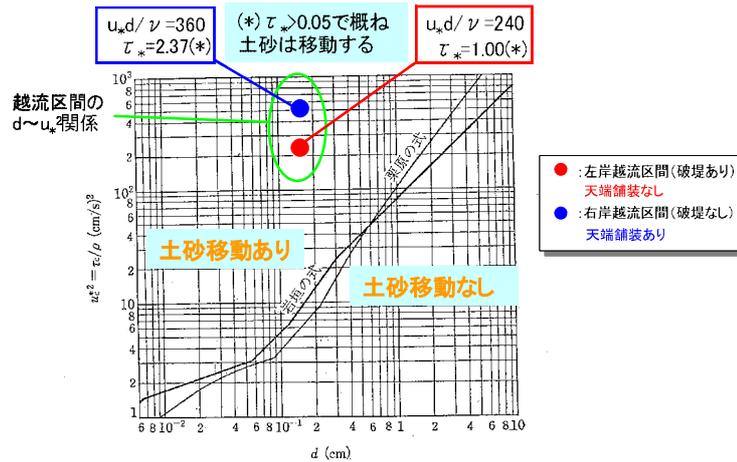
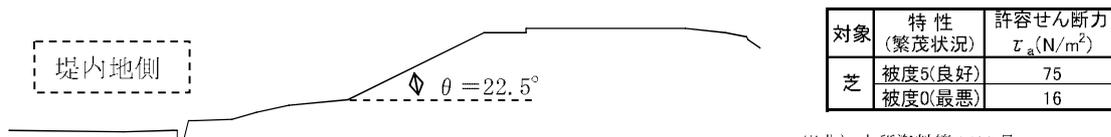


図-4.2.13 粒径と限界摩擦速度の関係

破堤近傍の断面面勾配と、裏のり面が芝の場合の許容せん断力を図-4.2.14に示す。

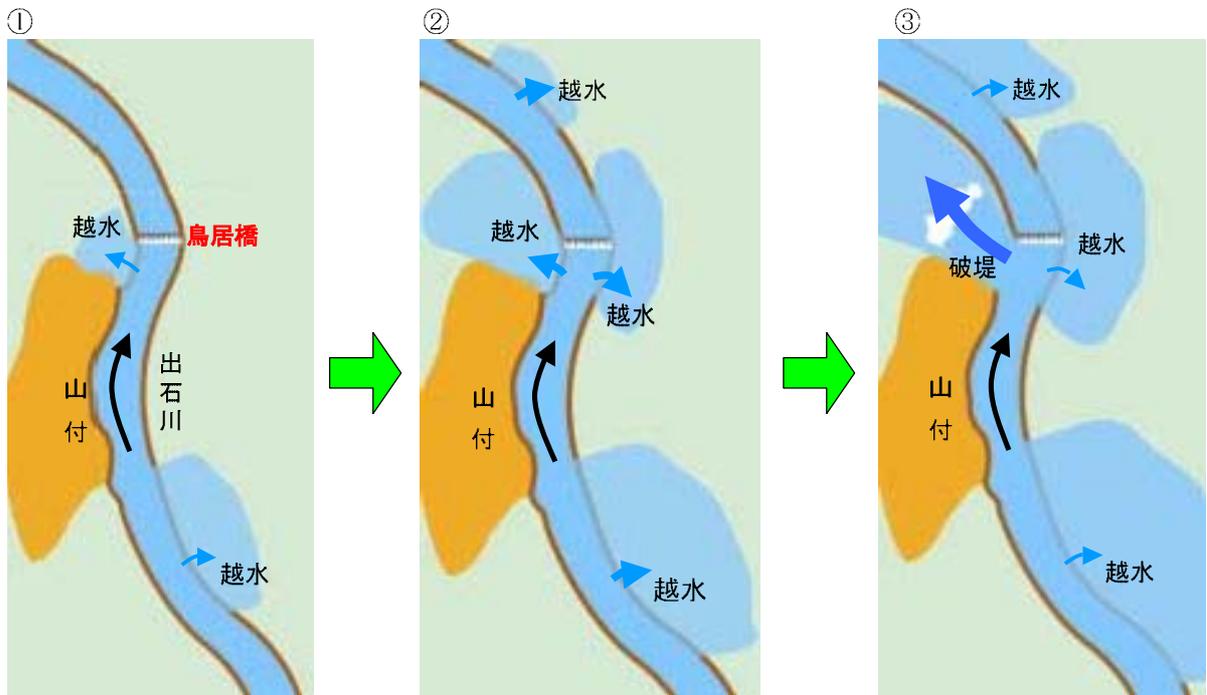


出典) 上研資料第3489号
「洪水を受けた時の多自然型河岸防護工・粘性土・植生の挙動」,河川研究室,H9.1.

図-4.2.14 断面勾配と許容せん断力

- ・再現計算による越流水深 (=0.47m) から、裏のり面に作用するせん断力 τ_0 は 410 N/m^2 となり、良好な繁茂状況の芝の許容せん断力 τ_a (= 75 N/m^2) を大きく上回る。
- ・法先での洗掘や侵食も破堤を助長した可能性があるが、越水による裏のり面での侵食力が大きく許容値を上回っており、越流水により堤防裏のり面において侵食・洗掘破壊が生じた可能性が高い。

(5) 破堤のイメージ



①	20日18:00前、鳥居橋によるせき上げによって水位が上昇し、鳥居橋上流左岸で越水が始まる。 18:00頃、集会場（鳥居橋西150m）が浸水、消防団員が天井に避難（消防団）。
②	20:00頃、鳥居橋付近の水位がピークに達し、越水量が最大となる。最大越流水深は約50cm、越流幅は約100m、最大流速は約1.7m/sと推定される。 19:00～19:30頃に鳥居橋付近の一部が欠損（地元住民）
③	23:20頃、越水開始から約5時間後、侵食が進んだ鳥居橋上流左岸で破堤した。 23:18破堤（消防団からの通報時刻）

黒字：推測事項 赤字：ヒアリング結果

(6) 破堤原因の特定(出石川左岸 5.4k 堤防)

「越流による裏のり面侵食」により破堤したものと推定される。
この地点は外水の水衝部に相当し、流下能力を越え越流した水が裏法尻部で集中する湾曲した堤防法線形状のため裏のり面の侵食が助長され、破堤したものと推測される。また、堤防断面が相当程度減少した状態において、外水圧または浸透の影響もあったものと推測される。