

令和元年東日本台風による堤防 決壊と堤防強化について

一般財団法人 国土技術研究センター
河川政策グループ 首席研究員
佐古俊介

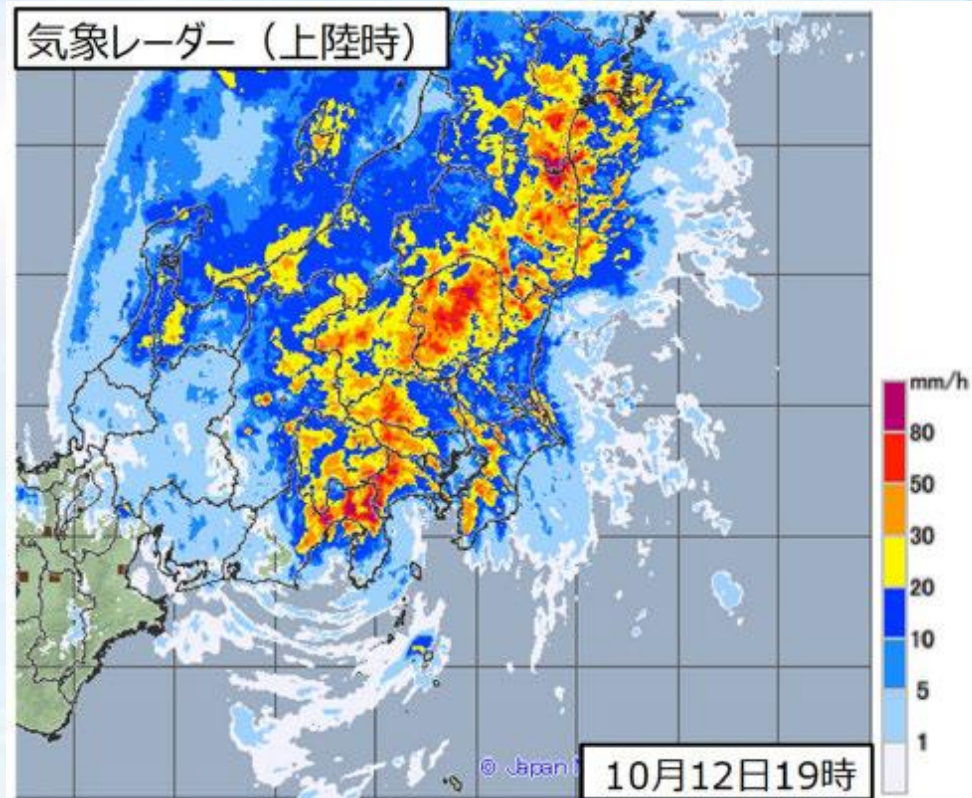
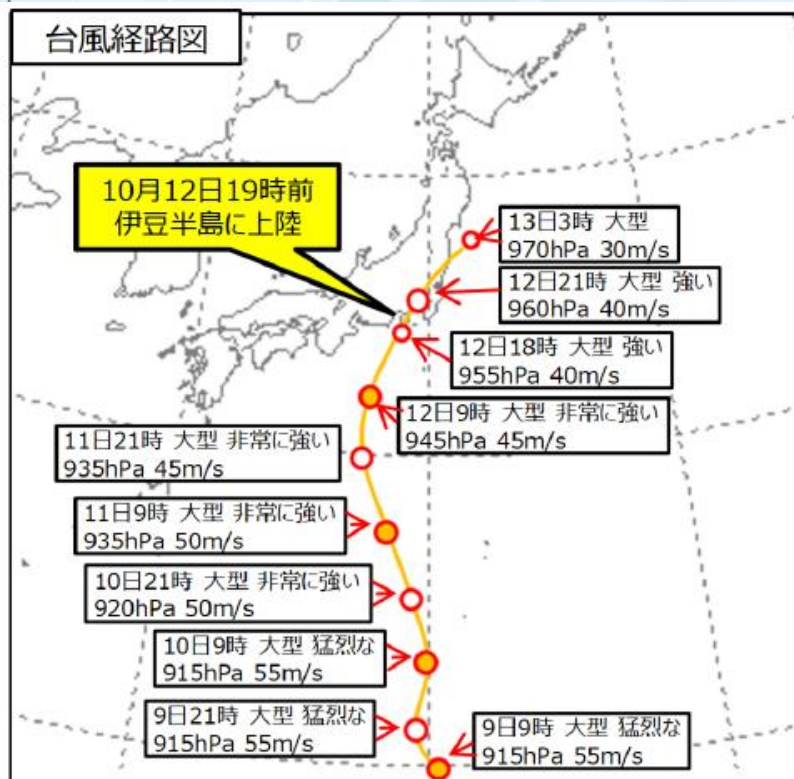
発表の内容

1. 台風19号による出水と被害の概要
2. 被災の概要と決壊原因の推定
3. 被災プロセスと堤防強化対策
4. 堤防強化における課題

1. 台風19号による出水と被害の概要

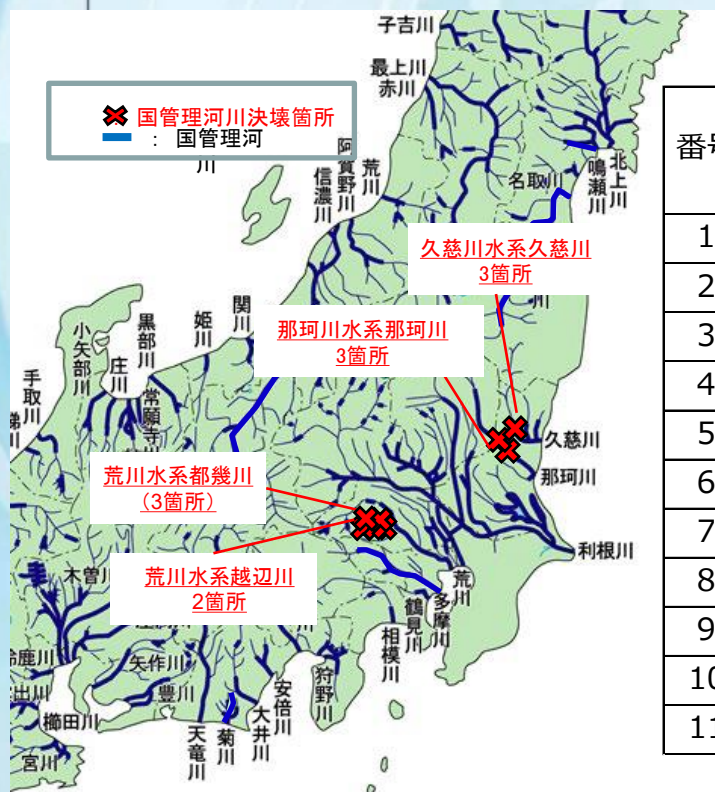
台風19号の概要

- 台風第19号は、10月12日19時前に、大型で強い勢力で伊豆半島に上陸した後、関東地方を通過、10月13日未明に東北地方の東海上に抜けた。
- 静岡県や関東甲信地方、東北地方を中心に広い範囲で500mmを超えた記録的な大雨となった。



関東地方整備局における被害の概要

- ◆ 関東地方整備局管内で決壊した河川で見ると、越辺川では高坂橋、天神橋、落合橋の3地点、都幾川では野本地点、那珂川では野口地点、久慈川では、富岡地点で計画高水位を超過した水位が記録され、観測史上第一位の水位を記録した。
- ◆ 今次出水による、関東地方整備局管内の直轄堤防の決壊箇所は越辺川2箇所、都幾川3箇所、那珂川3箇所、久慈川3箇所の計11箇所であった。



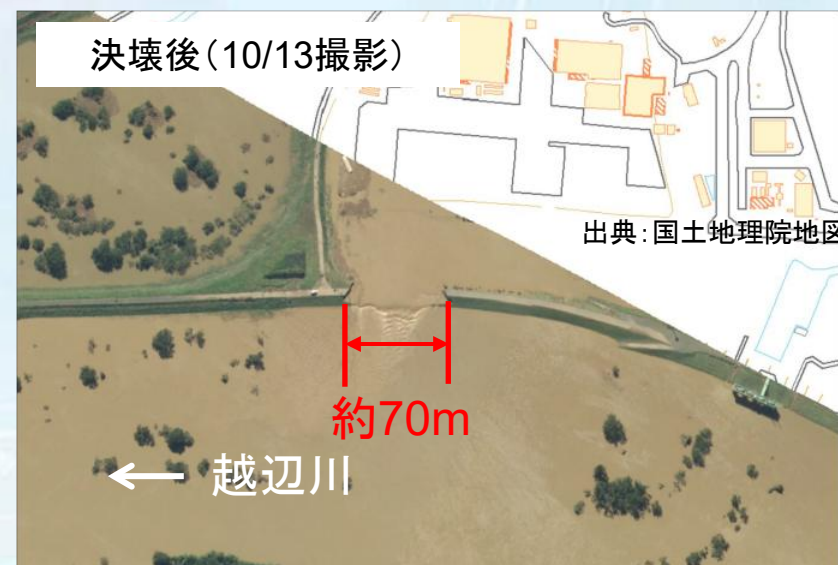
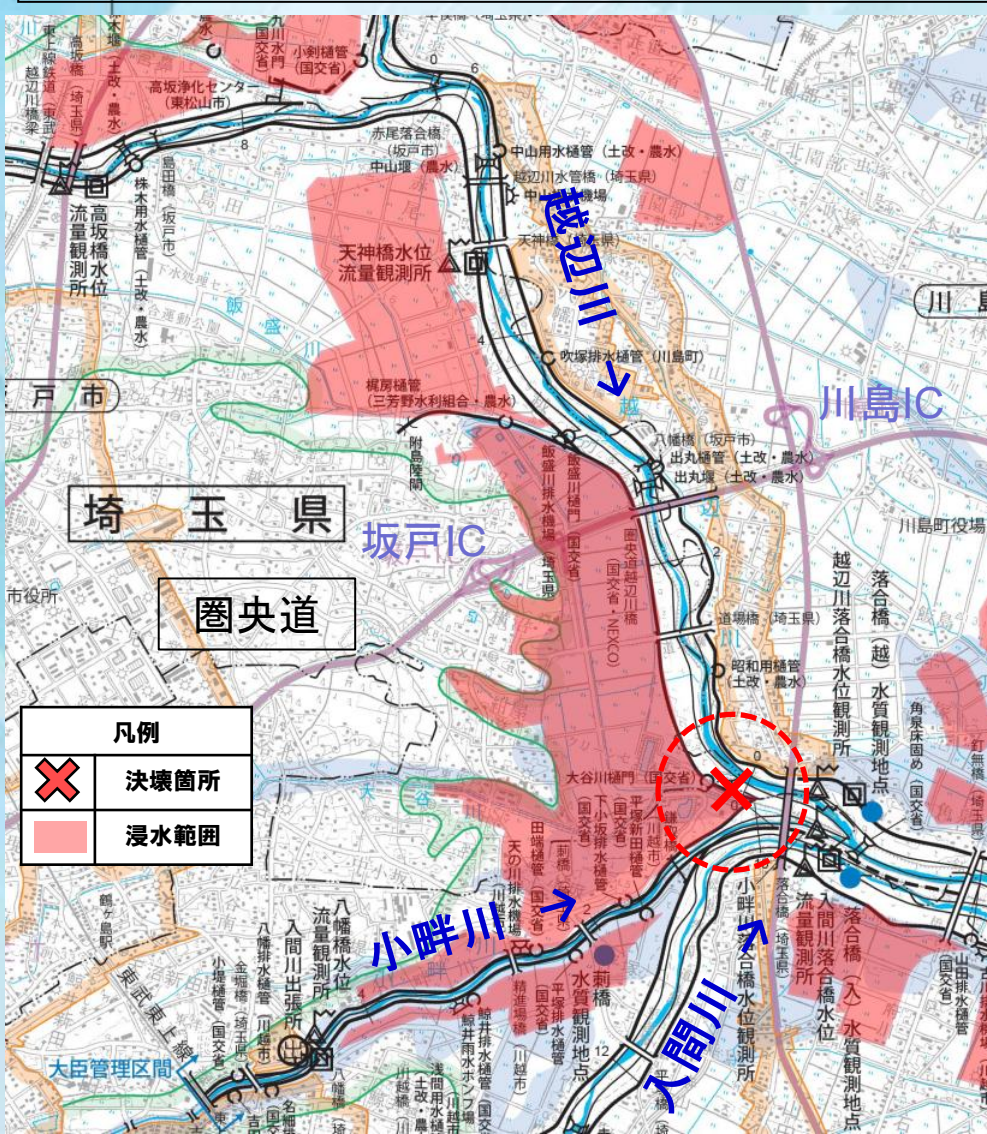
番号	河川名	箇所	土質			
			堤体		基礎地盤	
			内部	表層	地盤	表層
1	那珂川	R28.6k	礫質土	礫質土	礫質土	粘性土
2	那珂川	L40.0k	砂質土	シルト質砂	礫質土	砂質土
3	那珂川	R41.2k	互層	砂礫	礫質土	砂質土
4	久慈川	L25.5k	砂質土	シルト混じり	礫質土	砂礫
5	久慈川	R25.5k	粘性土	粘性土	礫質土	砂礫
6	久慈川	L27.0k	礫	シルト質砂	礫質土	砂礫
7	越辺川	R0.0k	粘性土	粘性土	粘性土	無
8	越辺川	L7.6k	粘性土	粘性土	粘性土	無
9	都幾川	R0.4k	粘性土	粘性土	粘性土	無
10	都幾川	R5.9k	粘性土	粘性土	礫質土	粘性土
11	都幾川	L6.5k	粘性土	粘性土	粘性土	粘性土

2. 被災の概要と決壊原因の推定

～決壊の原因は何だったのか？～

越辺川右岸0.0kにおける被災の概要

- ◆ 越辺川右岸0.0k、高さ3.9m、天端幅4.0mの堤防が決壊した。
- ◆ 決壊幅は約70mだった。



出典: 国土地理院地図

越辺川右岸0.0kにおける被災の状況

- ◆ 決壊箇所上流には越流水によると推定される約40mにわたる川裏部の洗掘が見られる。(①)
- ◆ 堤防川裏部植生の川裏側への倒伏や(③) フェンスの堤内地側への倒壊が見られる。(④)
- ◆ 決壊箇所周辺では、噴砂や漏水痕は確認されていない。(②)



①越流水によると推定される川裏部の洗掘



③川裏部の川裏側への植生の倒伏



堆積物のみで
噴砂の跡は確認
されない

②決壊箇所周辺では、噴砂等は確認されていない。

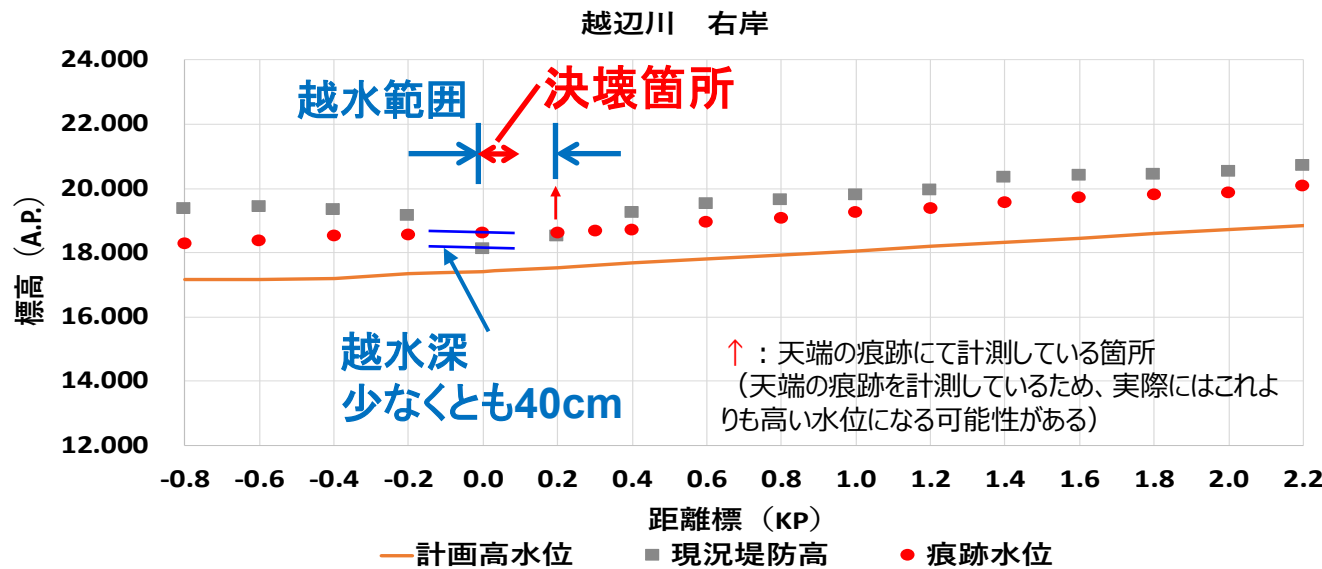


④フェンスの堤内地側への倒壊

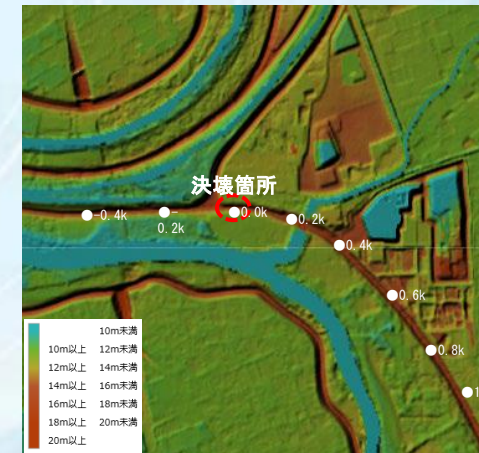
R1/10/16
撮影

越辺川右岸0.0kにおける越水の分析

- ◆ 越辺川右岸0.0kと0.2kの痕跡水位は現況堤防高を上回ること、また0.2k痕跡水位は天端の漂流物を計測しており天端高よりも高い水位であったことが疑われることより、越水範囲は0.0k～0.2kと推定される。
- ◆ 0.0kの痕跡水位と現況堤防高の差より、推定される越水深は少なくとも40cmと推定される。



氾濫流の様子 (10/13撮影)
出典：国土地理院地図



氾濫原の地形 (標高)
出典：国土地理院地図



右岸0.0k



右岸0.2k

越辺川右岸0.0kにおける浸透の分析

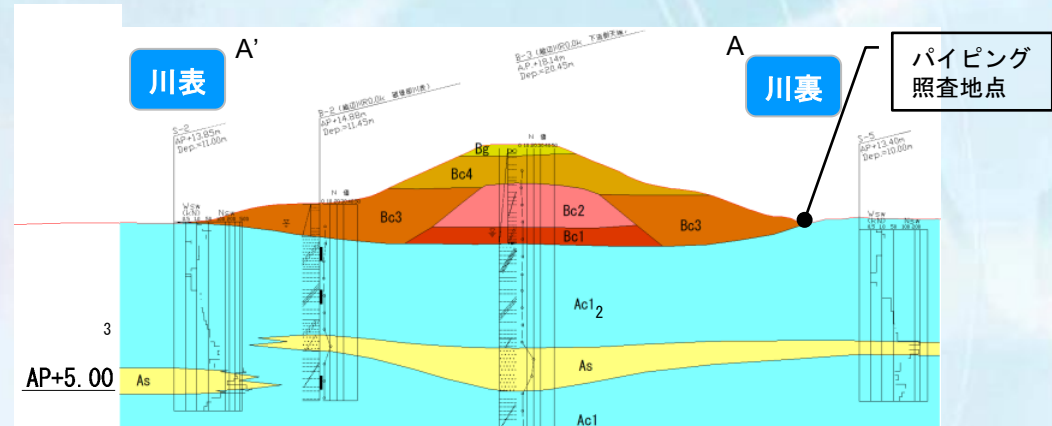
- ◆ 今次出水における浸透に対する照査の結果、すべり、パイピングともに基準値を満足している。
- ◆ 関東地方整備局管内11箇所の決壊箇所のうち、8箇所が同様の結果である。

地盤モデル（今回試験値の地盤定数）

土質	湿潤単位 体積重量 (kN/m^3)	透水係数 (m/s)	粘着力 (kN/m^2)	内部摩擦角 ($^\circ$)
Bg	18.00	2.28E-03	0.0	35
Bc4	18.50	5.93E-07	45.0	0
Bc3	18.50	3.00E-08	45.0	0
Bc2	18.50	3.17E-08	45.0	0
Bc1	18.50	1.65E-07	35.0	0
Ac1	18.00	3.00E-08	35.0	0
As2	18.00	2.60E-05	0.0	33
As3	17.00	9.50E-06	0.0	28
Ag	19.00	1.10E-05	0.0	28

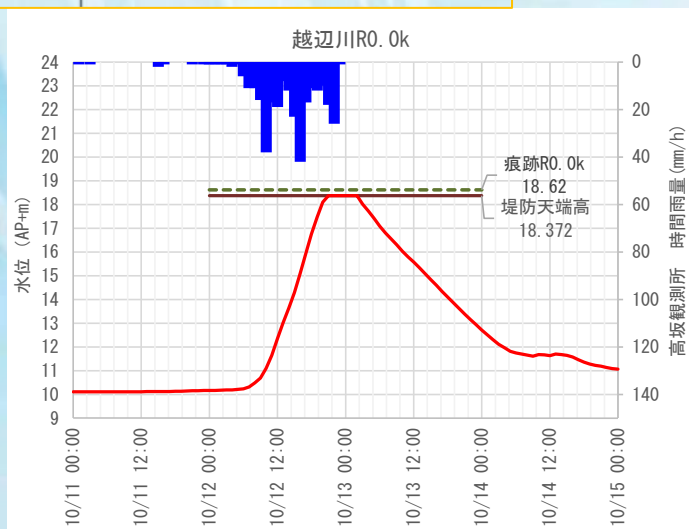
- 検討断面：決壊箇所の断面に現地土質構成を記載
- 土質定数：今回試験値の堤防土質定数により設定
- 検討外力：今次出水の降雨、水位ハイドロにより設定（水位は観測地点からHWL勾配で高さをスライドして適用）し、最高水位は堤防天端高とした。

検討断面（決壊箇所 越辺川R0.0k）



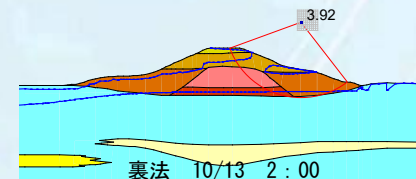
決壊箇所の堤体及び基礎地盤は粘性土主体であり、パイピングが起きやすい地質構成になっていない

外力条件（台風第19号）



※水位波形は越辺川落合橋水位観測所スライドにより設定

照査結果



【越辺川R0.0k】

モデル	時刻	表のり		裏のり		パイピング破壊	
		基準値	解析結果	基準値	解析結果	基準値	解析結果
・今回試験値を反映	天端到達時 10/12 21:00			$F_s \geq 1.32$	$F_s = 3.92$ (OK)	$i < 0.5$	ih (水平) = 0.00 (OK)
	越水終了時 10/13 2:00			$F_s \geq 1.32$	$F_s = 3.92$ (OK)		iv (鉛直) = 0.00 (OK)
	水位低下終了時 10/14 4:00	$F_s \geq 1.00$	$F_s = 3.92$ (OK)				

久慈川左岸27.0kにおける被災の概要

- ◆ 久慈川左岸27.0k、高さ2.1m、天端幅3.0mの堤防が決壊した。
- ◆ 決壊箇所は約65mにわたって決壊している。



久慈川左岸27.0kにおける被災の状況

- ◆ 決壊箇所は下流側よりも堤防高が低い（①）。堤防川裏部の植生は川裏側に倒伏している（②）。
- ◆ 堤防天端に越水による流木等の漂流物が残存している（③）。
- ◆ 川裏法尻付近では、噴砂や漏水痕は確認できない（①）。



- ①上流から下流側の堤防を見た状況
噴砂や漏水痕は確認できない



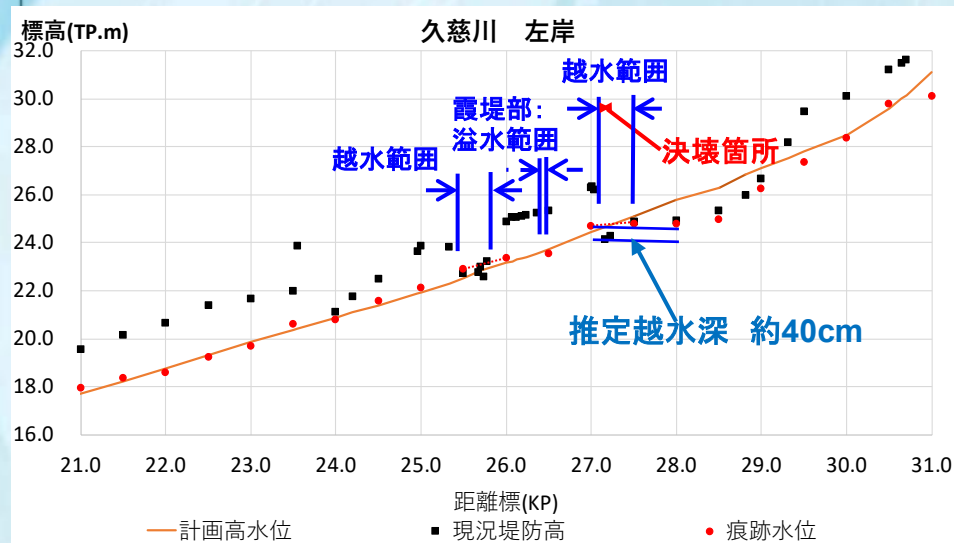
- ②天端から裏法にむかっての植生の倒伏が確認される。



- ③天端に越水による漂流物(流木)が残存

久慈川左岸27.0kにおける越水の分析

- ◆ 27.0k と27.5 k の痕跡水位は現況堤防高を上回ることから、越水範囲は27.0k～ 27.5 k と推定される。
- ◆ 27.0kの痕跡水位と現況堤防高の差より、推定される越水深は約40cmと推定される。



出典：防災科学研究所
クライシスレスポンス
サイト

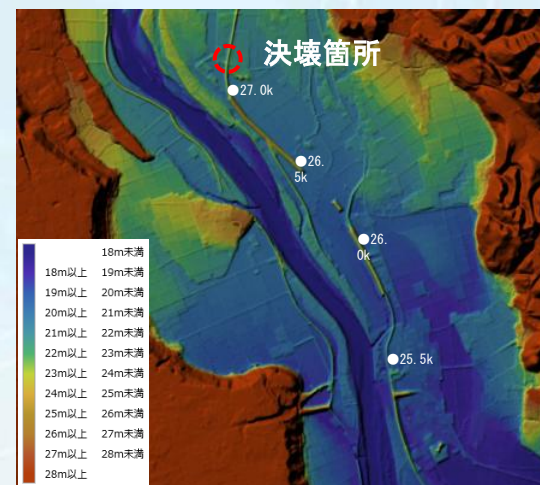
氾濫流の様子 (10/13撮影、衛星画像)



左岸27.0k



左岸27.0k(決壊箇所下流)



出典：国土地理院
の電子地形図
1/25000を掲載

氾濫原の地形 (標高)

久慈川左岸27.0kにおける浸透の分析

- ◆ 今次出水における浸透に対する照査の結果、パイピングの基準値を満足していない。
- ◆ 関東地方整備局管内11箇所が決壊箇所のうち、2箇所が同様の結果である。

- ◆ 検討断面：決壊箇所の断面（定期横断27.5k）に現地土質構成を記載
- ◆ 土質定数：既往資料に今回試験値（決壊断面の粒度試験まで）を反映して設定
- ◆ 検討外力：今次出水の降雨、水位ハイドロにより設定（水位は観測地点の水位とHQ式から流量を求め27.5kのHQ式を用いて設定、最高水位は堤防天端高とした）

地盤モデル

断面	土層		単位体積重量	透水係数	粘着力	内部摩擦角	設定根拠	
			γ_t (kN/m^3)	k (cm/s)	c (kN/m^2)	ϕ ($^{\circ}$)		
久慈川 左岸 27.0k	堤体	Bc	粘性土	18.6	1.40E-5	51.0	0.0	決壊断面粒度D20 現場透水
	基礎	Ag2	礫質土	20.0	1.61E-1	0.0	41.0	
	地盤	Tr	岩盤	18.5	1.00E-6	173.0	20.0	

※赤字は今回試験値

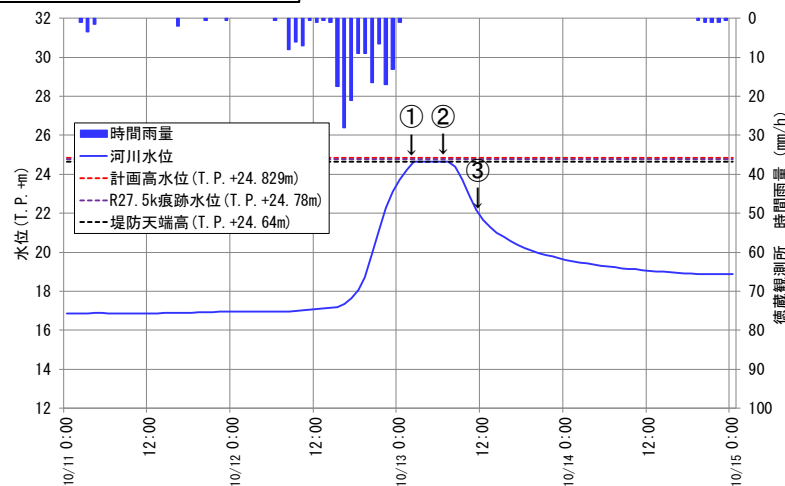
Bc層は、採取3試料のD20 (0.0113mm・0.0123mm・0.0105mm) からそれぞれクレーガーの推定方法で透水係数を推定し、その平均値を採用

※黒字は詳細点検（那珂川左岸27.0k）の設定値

※青字は既往資料に基づく設定値

外力条件（台風19号）

久慈川左岸27.0k

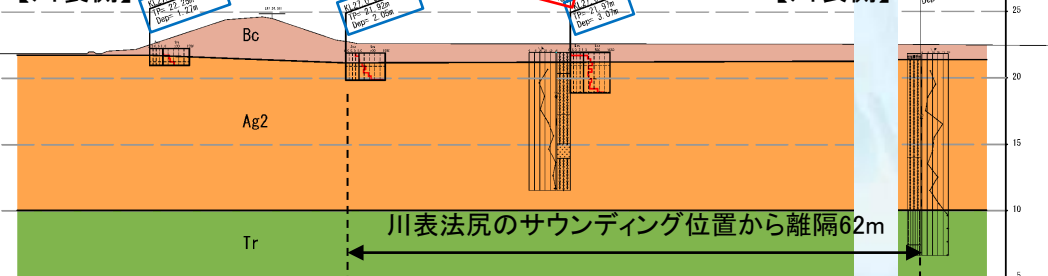


検討断面（決壊箇所 久慈川左岸27.0k）

凡例
(囲いなし): 既往調査結果
□: 今回調査結果(ボーリング)
□: 今回調査結果(サウンディング)

【川裏側】

【川表側】



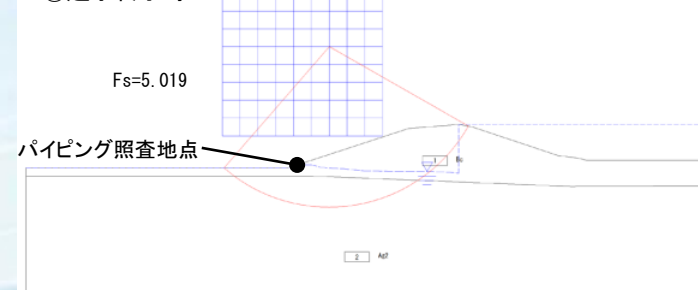
照査結果

河川水位	時刻	すべり破壊		パイピング破壊
		川表	川裏	G/W
		Fs	Fs	
①天端到達時	10/13 02:00	-	5.176	0.938
②越水終了時	10/13 07:00	-	5.019	0.789
③水位低下時	10/13 12:00	6.553	-	-
基準値		$F_s \geq 1.0$	$F_s \geq 1.440$	$G/W > 1.0$

: OK

: OUT

②越水終了時



被災原因の推定

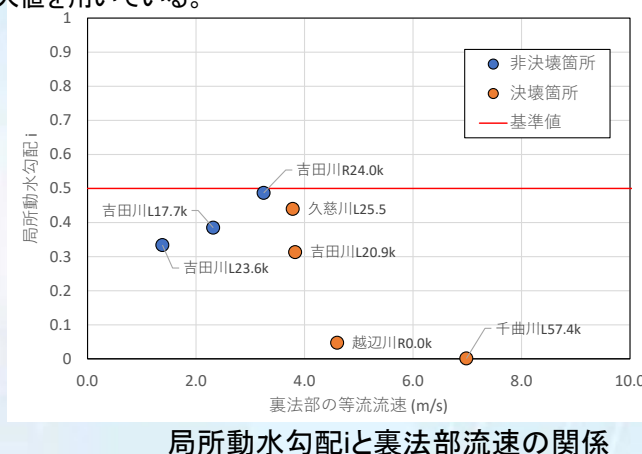
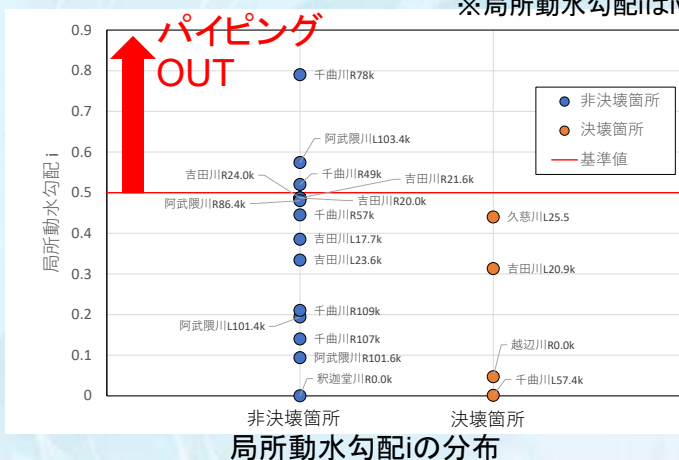
- 被災後の現地状況や、痕跡水位等から推定を行った結果、越水が決壊の主要因になったと推定される。
 - 一方で、決壊した一部の箇所（久慈川左岸27.0k、那珂川左岸40.0k）では、解析の結果、浸透の影響は排除できないところもあるが、被災後の現地状況では、噴砂や漏水が確認されないことから、浸透が決壊の要因になった可能性は低いと推定される。
- 詳細点検の結果を用いて、台風19号による全国直轄河川の越水箇所で決壊と浸透の関係が確認できるか分析を実施した。

詳細点検結果での比較(パイピング)

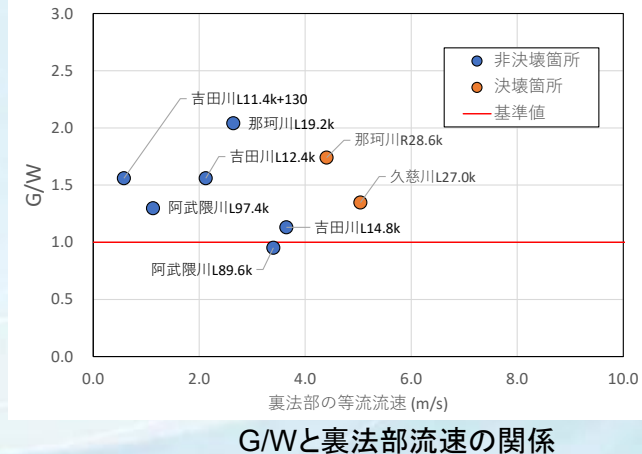
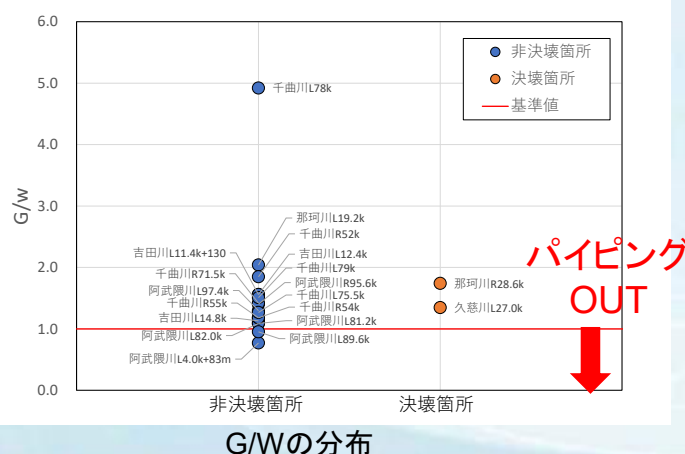
- 決壊箇所と未決壊箇所の詳細点検時におけるパイピングの計算結果を整理した。
- また、裏法部の等流流速が算出可能であった箇所については、等流流速との関係を整理した。
- 決壊箇所では、既往の詳細点検実施箇所のうち、パイピングの安全率を満足しない箇所は無かった。
- 非決壊箇所では、パイピングの安全率を満足しない箇所は32箇所中5箇所である。
- 決壊箇所と非決壊箇所で局所動水勾配 i やG/Wの分布に明瞭な違いは確認できない。

局所動水勾配 i

※局所動水勾配 i はivとihの最大値を用いている。

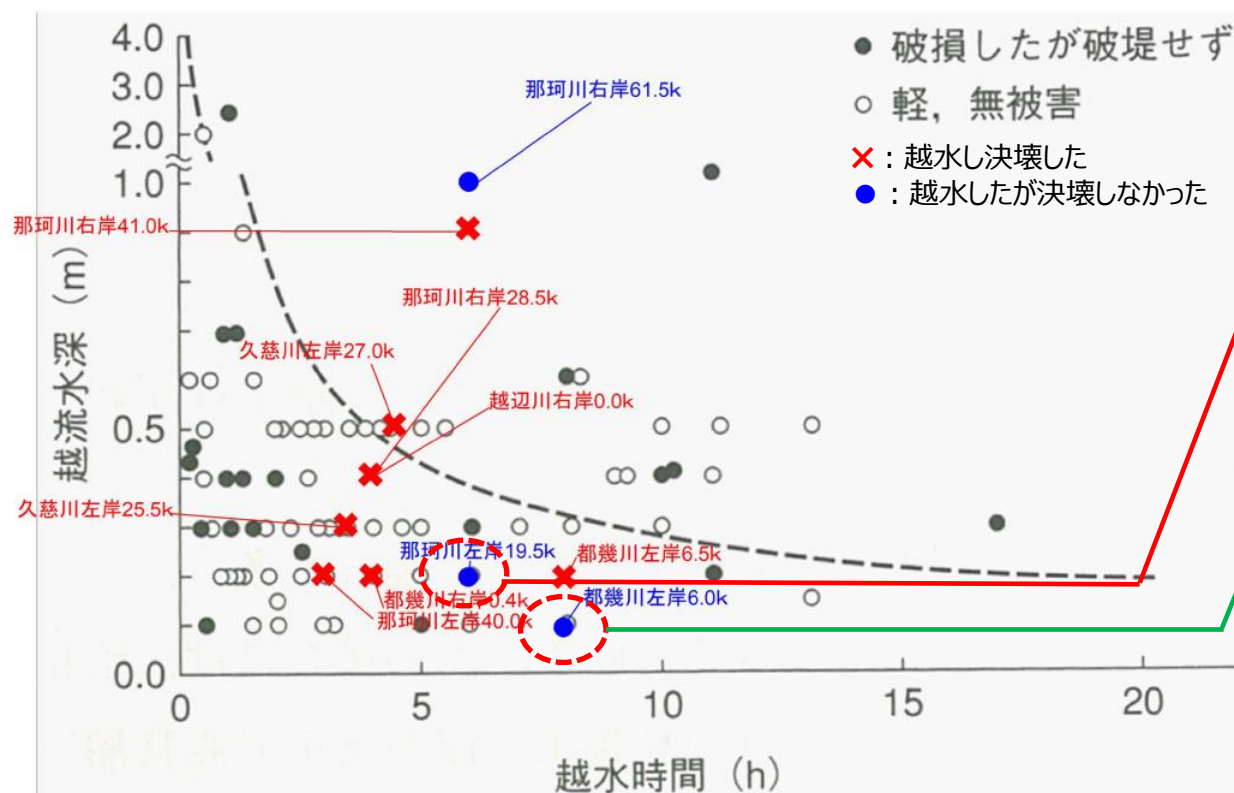


G/W

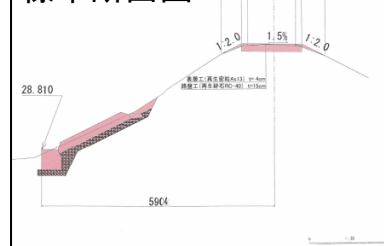


決壊箇所における越水外力

- ◆ 今回の決壊箇所は2/3が“外力が越水外力が小さいエリアに位置しており、また過去の越水したが破堤しなかった事例75%をカバーする破線内に入っている。
- ◆ なお、75%をカバーする破線内のうち越水時間が長いにもかかわらず決壊しなかった、都幾川左岸6.0kは危機管理型ハード対策実施箇所である。
また、那珂川左岸19.5kは裏のりに吸出防止材が設置されている。



危機管理型ハード対策の標準断面図



※土木研究所資料2074号 越水堤防調査最終報告書-解説編-
「越水したが破堤しなかった事例」について整理されている図に加筆。

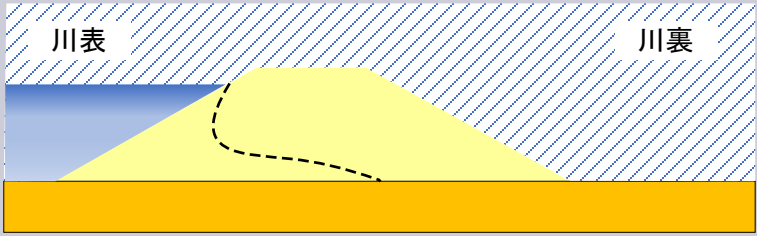
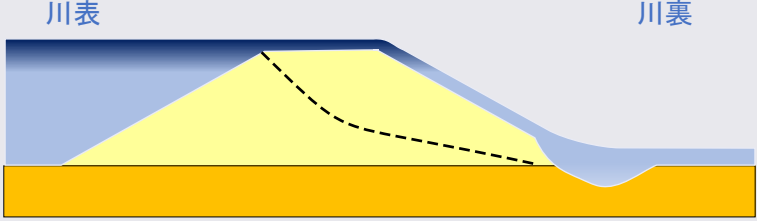
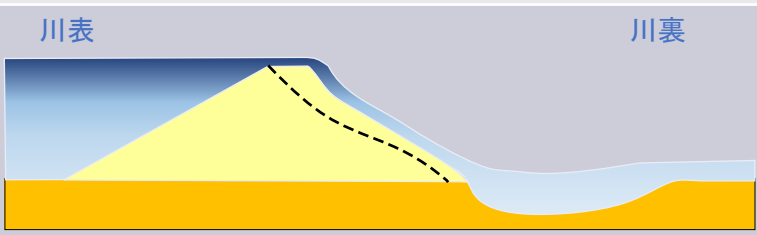
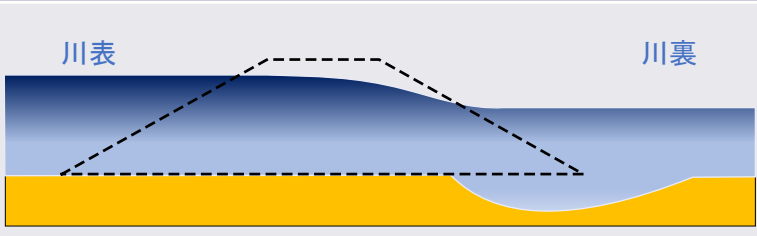
注: 破線は越流水深60cm、越水時間3時間の点を通り、総越流量が一定となるように引いた線。元図においては総点数90点のうち68点がこの線より下になっており、75%がこの線より下となる。

3. 被災プロセスと堤防強化対策

～どのような対策を行うのか？～

堤防決壊のプロセス

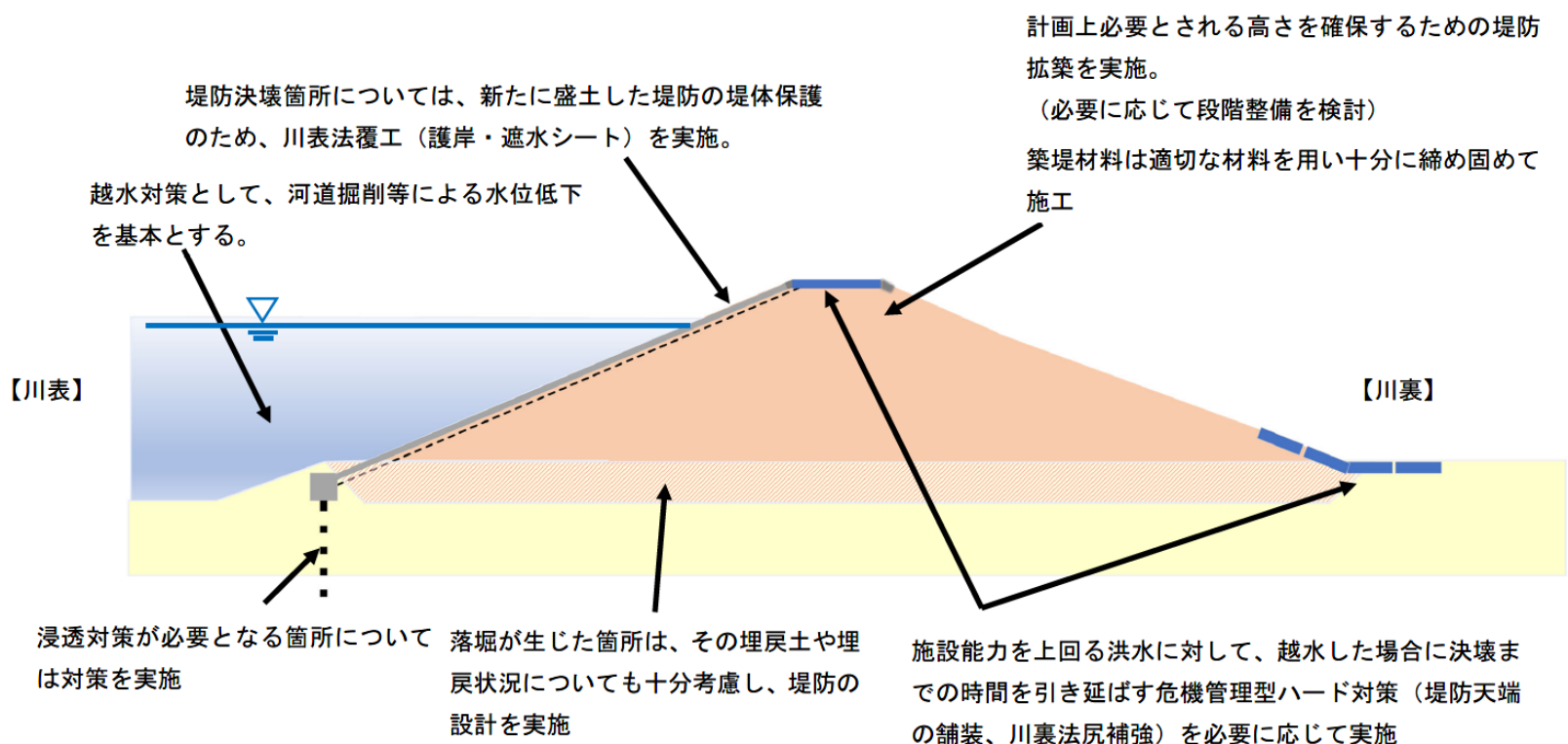
◆堤防決壊箇所のプロセスは以下の通りと推定される。

段階	プロセス	概要図
Step 1 激しい降雨 河川水の上昇	・多量の降雨により河川水位が上昇する。	
Step 2 越水の開始	・さらに河川水位が上昇するとともに、越水が発生したと推定される。	
Step 3 堤防断面の減少	・時間の経過とともに、越流水の作用により川裏法尻の洗掘や天端の侵食が進行し、堤防断面が徐々に減少する。	
Step 4 決壊	・さらに川裏法尻部の洗掘が進み、又はその途中で川表側からの水圧に耐えきれず堤防が決壊したと推察される。	

※堤防の規模及び土質構成は箇所毎に異なる

堤防強化対策案

- 越水対策として、河道掘削等による水位低下を基本。
- 計画上必要とされる堤防高を確保。また、築堤材料は適切な材料を十分に締め固めて施工。
- 施設能力を上回る洪水に対して、越水した場合に決壊までの時間を引き延ばす危機管理型ハード対策（堤防天端の舗装、川裏法尻補強）を必要に応じて実施
- 必要に応じて、堤防や基礎地盤の浸透等対策工（矢板等）を実施する。
- 堤防決壊箇所については、新たに盛土した堤防の堤体保護のため、川表法覆工（護岸・遮水シート）を実施。

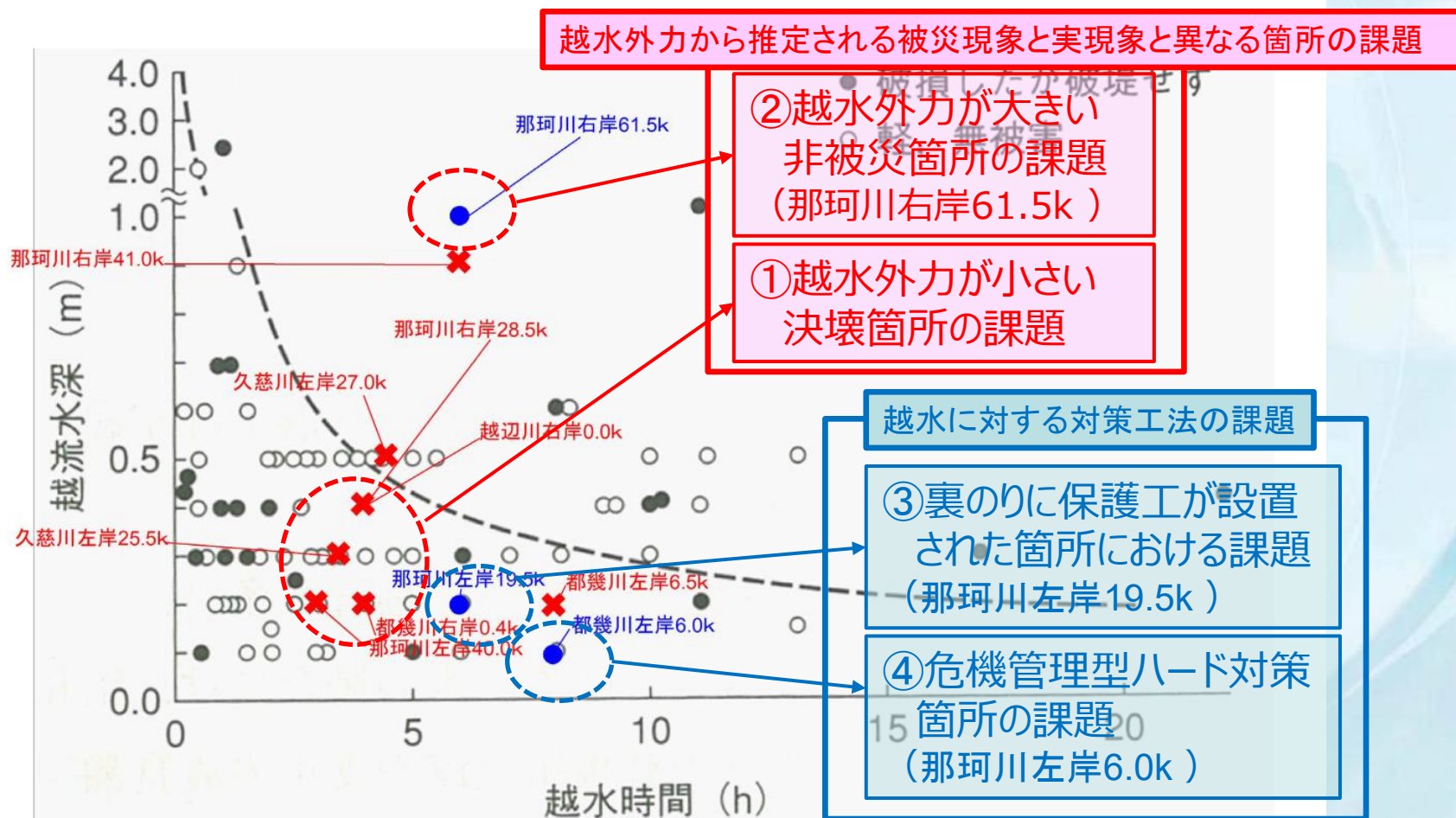


4. 今後の堤防強化における課題

～より確実性の高い今後の越水対策に向けて～

課題抽出にあたっての着目点

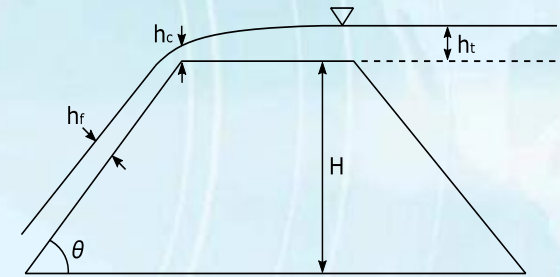
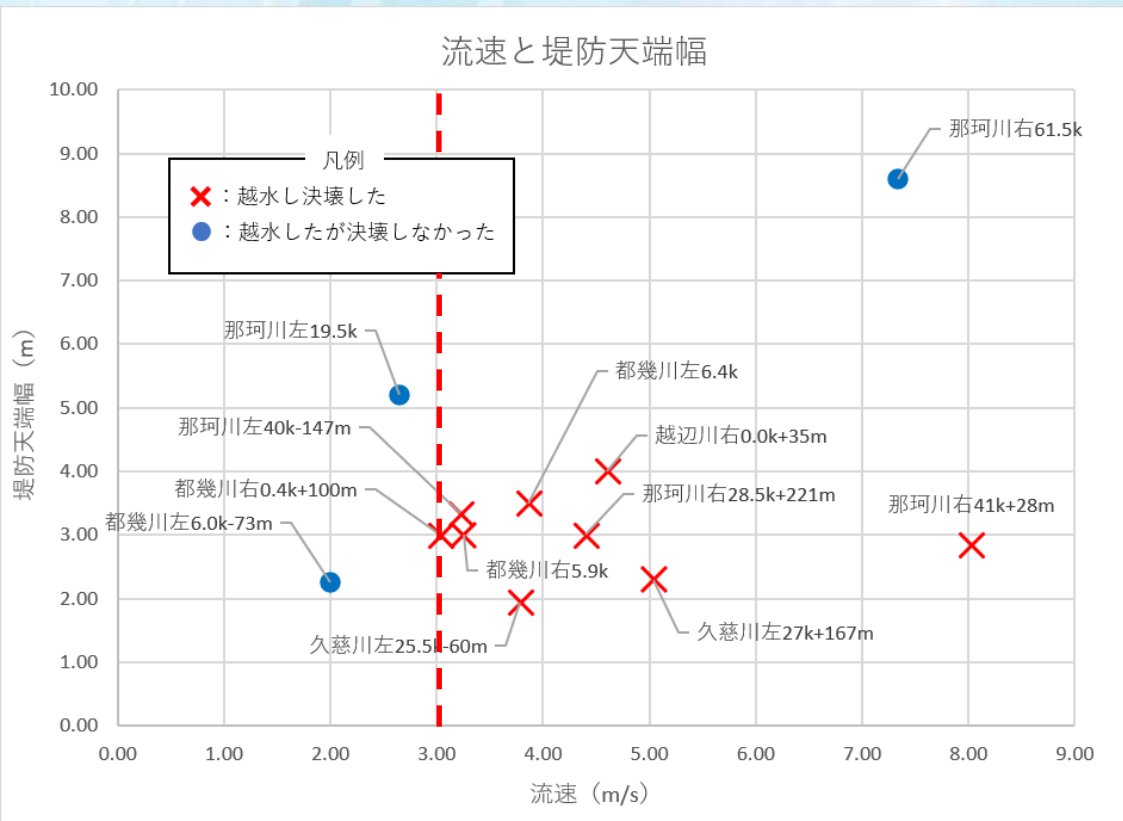
- ◆ 今後の越水に対する堤防強化における課題について抽出する
- ◆ 着目したのは、関東地整管理河川の、**越水外力から推定される被災現象が実現象と異なる箇所**と、**危機管理型ハード対策等の実施箇所**



※土木研究所資料2074号 越水堤防調査最終報告書-解説編-
「越水したが破堤しなかった事例」について整理されている図に加筆。

①越水外力が小さい決壊箇所の課題

- ◆ 従前の最大越流水深と越水時間に関わる評価として、越流速（せん断力）による評価を試行した。
- ◆ 越流速は、従来の最大越流水深や越流時間に加えて、堤防形状（高さ、裏法勾配）等の要素が入っており、外力の指標としては総合的といえるが、現在の距離標毎の測量密度では不十分。
- ◆ 今回決壊箇所では越流速の大きい領域（3m/s以上）で決壊している。



$$v_f = \frac{q}{h_f}$$

$$q = \sqrt{gh_c^3}$$

$$h_f = \left(\frac{n^2 g}{i} \right)^{\frac{3}{10}} h_c^{\frac{9}{10}}$$

$$h_c = \frac{1}{3(h_t + H)^2} h_c^3 + \frac{2}{3} h_t$$

②越水外力が大きい非被災箇所課題 (那珂川右岸61.5k)

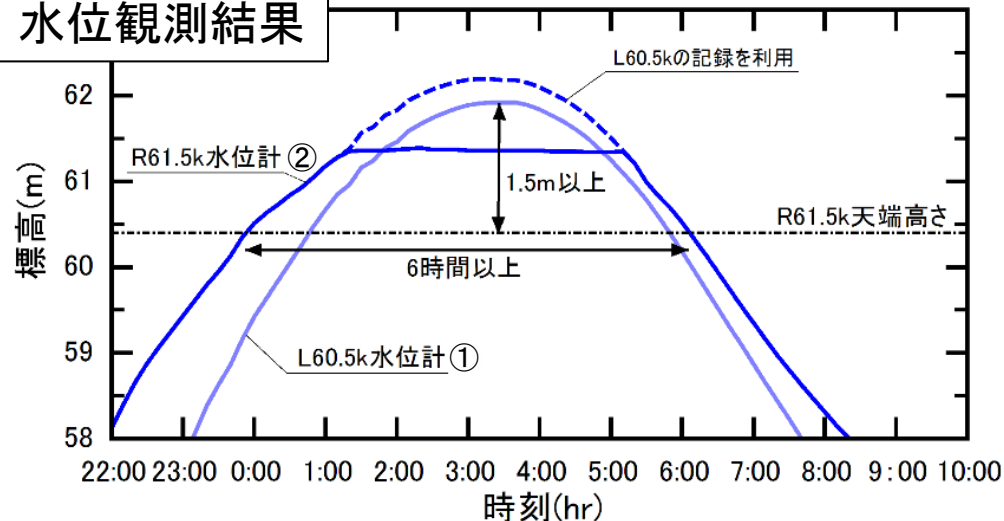


付近の危機管理型水位計による観測結果を精査したところ、越流水深1.5m以上、越流継続時間6時間以上の可能性がある。

狭窄部

越水区間
右岸61.0k～右岸61.5k

水位観測結果

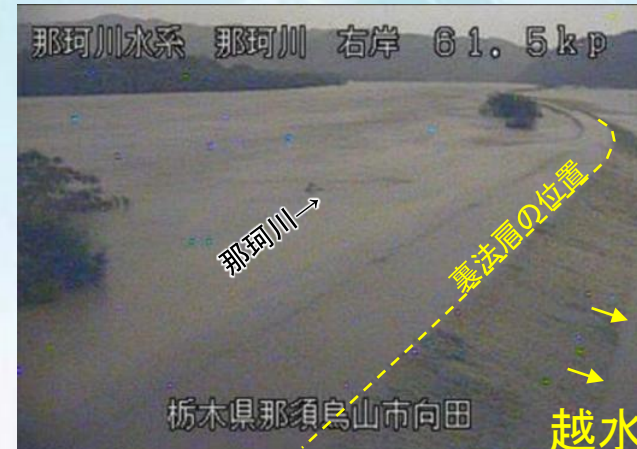


那珂川R61.5k付近のCCTV記録

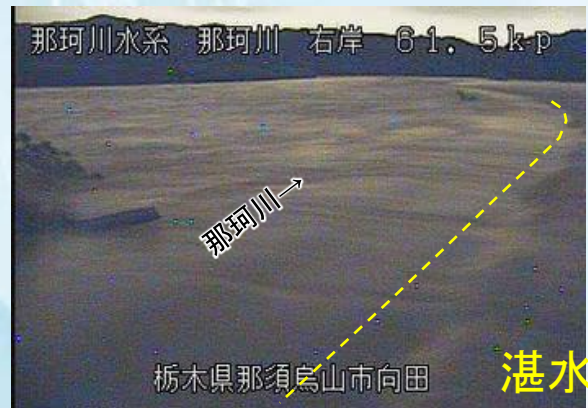
- ◆ 堤内地の湛水状況によって、堤防に作用する外力は大きく変化する。
- ◆ 最大越流水深、継続時間だけでは、外力の大きさを上手く評価できない場合もある。



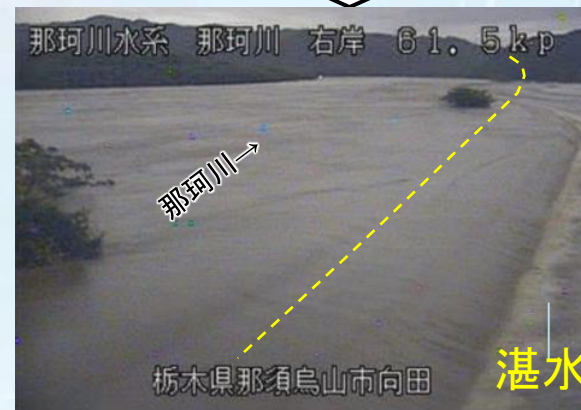
平常時



令和元年10月12日23時54分(越水開始頃)

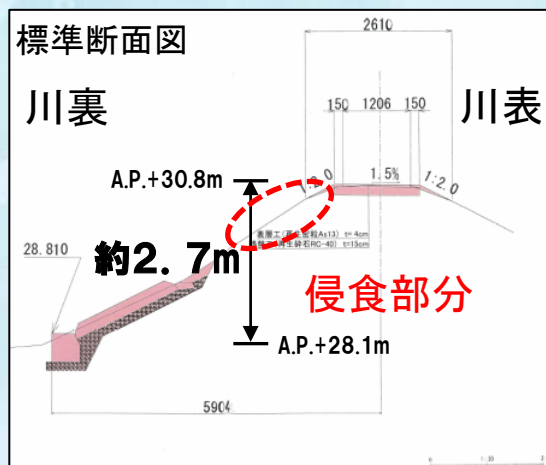


令和元年10月13日 1時 4分
令和元年10月13日1時34分以降、
機器浸水のため、記録画像なし

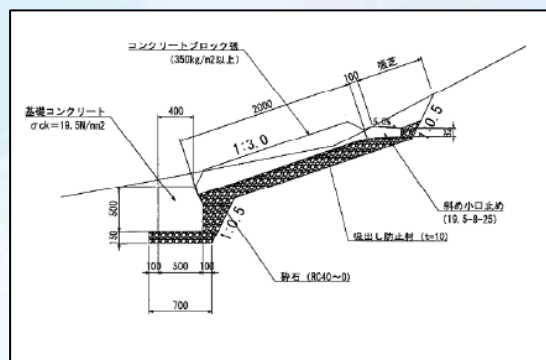


令和元年10月13日 0時15分

- 位置図
-
- 東松山市



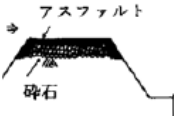
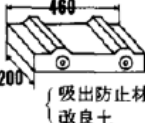
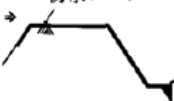
- 危機管理型ハードは、H29年度施工。
- 長時間の越流に耐えたが、川裏法肩から裏法ブロックにかけて侵食有り。

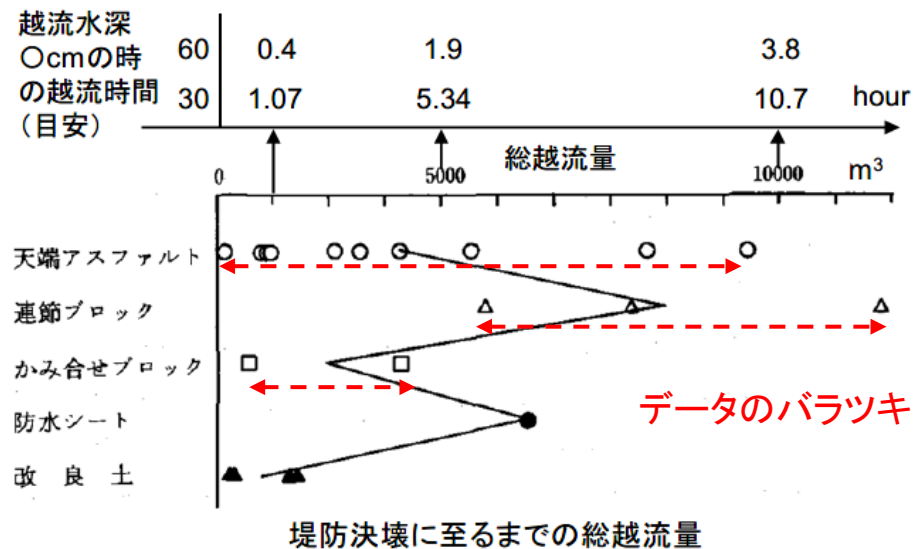


④対策工法の課題（裏法保護工）

- ◆ 過去に、法面及び法尻保護工として連節ブロック、かみ合わせブロック、防水シート、改良土を用いてその効果を大型堤防模型実験（堤高2.5m）によって実験。
- ◆ 効果を単純に比較すると、**決壊に至るまでの総越流量のバラツキが大きい。**

堤防強化工法の概略

保護工	構造一般図	材料項目一般	摘 要
天端アスフィルト (10 ケース)		密粒度アスファルト 粗粒度アスファルト 砕 石	遮水壁の設置、 ロープの埋設の 効果の検討
連節ブロック (4 ケース)		 吸出防止材 改良土	鉄線、ロープに よる連結、改良 土を用いた場合 の検討
かみ合せブロック (2 ケース)		 吸出防止材	かみ合せ効果 の検討
防水シート (2 ケース)		1mm厚合成ゴム シート	シートの設置方 法の検討
改 良 土 (4 ケース)		砂質土：消石灰 1 : 10 (重量比) 粘性土：アスファルト 乳剤 1 : 10 (重量比)	改良剤、施工方 法の検討



出典)加藤善明・橋本宏・藤田光一：堤防の耐越水化に関する実験的研究、
第29回水理講演会論文集、1985。

堤防強化における課題

【越水外力から推定される被災現象が異なる箇所の課題（①、②）】

- 最大越流水深、継続時間だけではなく、越流速や堤内地湛水状況も含めた分析が必要である。
 - 延長方向に連続的な堤防諸元(形状、土質、植生管理状況等の情報)の蓄積・更新・高分解能化を図っていくことが必要。
 - 堤内地も含めてモニタリングできる体制の強化を図るとともに、内水位を考慮した越水外力の評価方法について検討していくことが必要。

【越水に対する対策工法の課題（③、④）】

- 危機管理型ハード対策の一定の有効性が確認されたが、以下の課題があり、越水に対する確実な対策になっていないことを認識しておく必要がある。
 - 越水に対して十分な抵抗力を持っているわけではないこと
 - 既往実験結果より、越水に対する効果のバラツキ等があることが分かっていること
- これまでの実験結果や検討成果をベースに、壊れ方の想定から工法の特長や実力について整理、技術的な細部を詰めていくことが必要。

まとめ（今後の堤防強化に向けて）

- 洪水対策は河床掘削や洪水調節施設の設置等により、洪水時の河川水位を下げる対策が基本だが、上下流バランスの問題や用地確保の問題等から直ぐには困難。気候変動に伴う水災害の頻発化・激甚化から、越水に対する堤防の強化は危機管理の視点からきわめて重要。
- 今後の堤防強化に向けては、以下の2点について引き続き研究していく必要がある。
 - ▶ 越水に対する強化工法の設計手法の標準化：

対策工そのものや外力設定等、課題もまだ多く、被災事例の継続的な分析や実験等、今後の継続的な研究が必要。
 - ▶ 強化を行う区間の設定：

越水しやすい箇所（例えば、狭窄部や支川合流部、湾曲部、河川横断工作物による堰上げ区間等）の適切な設定に加えて、上下流バランス（強化を上流側で行う場合、下流側に洪水外力の負荷をかけることになるため）についてどのように考えて設定するか、今後の継続的な研究が必要。