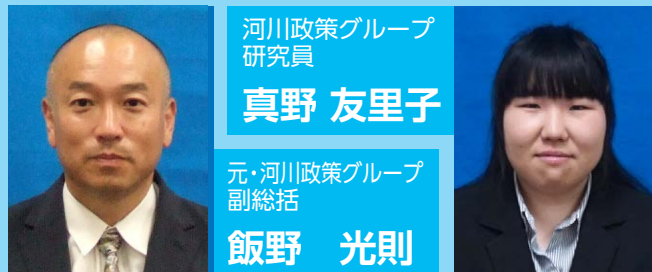


令和元年東日本台風による堤防決壊と堤防強化について



1 はじめに

河川堤防は、洪水・高潮による水災害防御の根幹的施設として古くから整備が進められてきており、安全で安心な社会や地域づくりを進めていくにあたっての重要な社会基盤施設の一つである。

令和元年10月の台風第19号では、全国で142箇所（国管理区間：14箇所、県管理区間：128箇所）もの河川堤防の決壊が発生するなどし、各地で甚大な浸水被害が発生した。

また、平成27年関東・東北豪雨や、平成29年九州北部豪雨、平成30年西日本豪雨など、近年、施設能力を超える洪水による災害が頻発している。

さらに、IPCC（国連気候変動に関する政府間パネル）第5次報告書において、気候システムの温暖化には疑う余地がないこと、中緯度の陸地などで21世紀末までに極端な降水がより強く、頻繁となる可能性が非常に高いことなどが示されており、気候変動に伴う降雨量の増加や海面水位の上昇等による水災害の頻発化・激甚化が懸念されている。

今次出水をはじめとする近年の甚大な浸水被害に加え、今後気候変動により水災害が頻発化・激甚化することが想定されていることを踏まえると、施設能力を超える洪水に対して、洪水時の河川の水位を下げて洪水を安全に流すための抜本的な治水対策や流域における対策を進めることを基本としつつ、危機管理として河川堤防の強化を実施するなど、浸水による被害をできるだけ減らすための効率的・効果的な対策を進めることが必要となっている。

本研究は、関東地方整備局管内で、令和元年10月台風第19号により堤防決壊等の甚大な被害が発生した荒川水系越辺川・都幾川、那珂川水系那珂川及び久慈川水系久慈川における、堤防決壊の実態から被災メカニズムを明らかにすると共に、本復旧工法の検討を行ったものである。併せて、今回の堤防被災を踏まえた今後の堤防強化に関して、解決すべ

き技術上の課題と、河道の特徴を踏まえた堤防強化の必要箇所の提案を行ったものである。

2 台風19号による出水と被害の概要

2.1 令和元年台風19号による降雨の概要

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、関東地方を通過し、10月13日未明に東北地方の東海上に抜けた。

台風本体の発達した雨雲や台風周辺の湿った空気の影響で、静岡県や関東甲信地方、東北地方を中心に広い範囲で記録的な大雨となった。10月10日からの総雨量は神奈川県箱根町で1,000mmに達し、関東甲信地方と静岡県の17地点で500mmを超えた。この記録的な大雨により、10月12日15時30分に静岡県、神奈川県、東京都、埼玉県、群馬県、山梨県、長野県の7都県に、10月12日19時50分に茨城県、栃木県、新潟県、福島県、宮城県に、10月13日0時40分に岩手県に特別警報を発表した。

台風本体の発達した雨雲や台風周辺の湿った空気の影響により、荒川流域においても多くの雨量観測地点で既往最高に迫る雨量となり、横瀬雨量観測所、三峰雨量観測所では観測史上最高雨量を観測した。

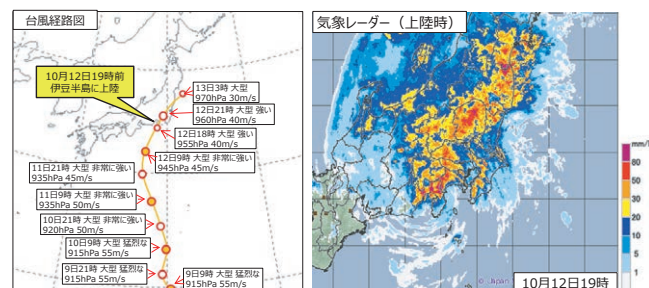


図1 台風19号の経路と台風上陸時の降雨の状況

関東地方整備局管内で決壊した河川で見ると、^{おっべ}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。

2.2 被災の概要

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^{おっべ}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。以下にその一覧について示す。

なお、5番の久慈川右岸25.5kについては、上流側の越流水が堤内地を流下し、川側に戻る際に越水して破堤した逆越流箇所であるため、以降の検討からは除外する。

表1 関東地方整備局管内の直轄堤防の堤防決壊箇所

番号	河川名	箇所	土質			
			堤体	堤体 表層	基礎 地盤	基礎 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 砂	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

3 被災の概要と決壊原因の推定

関東地方整備局の全11箇所の被災のうち、代表事例2箇所の被災メカニズムについて以下に示す。

3.1 ^{おっべ}越辺川0.0kにおける堤防決壊

(1) 被災の概要

^{おっべ}越辺川右岸0.0k付近の決壊は、^{おっべ}越辺川と小畦川の合流付近において発生しており、^{おっべ}越辺川の緩い湾曲部外岸側にあたっている（図2）。越水や決壊の時刻については確認されていない。決壊幅は最終的には約70mに達している。

(2) 決壊要因の検討

決壊箇所上流には約40mにわたり越水によると推定される川裏部の侵食が見られる（写真1左）とともに、堤防川裏部の植生は川裏側に倒伏が確認された。また、越水した状況を裏付けるように、堤内地ヘリポート付近のフェンスの堤内地側への倒壊や引っかかった漂流物等が見られる（写真1右）

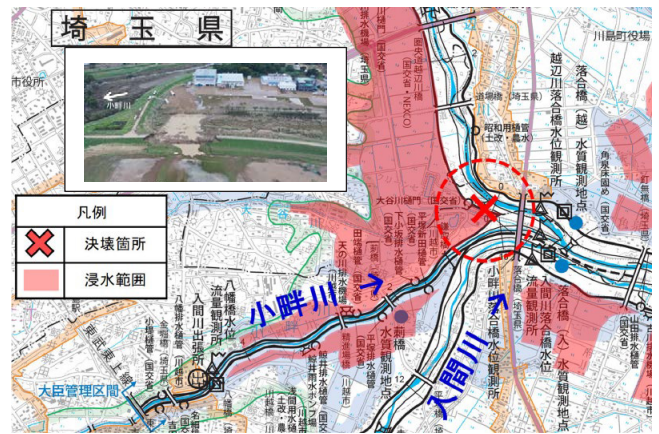


図2 ^{おっべ}越辺川右岸0.0kの決壊箇所



写真1 ^{おっべ}越辺川右岸0.0kの決壊状況

^{おっべ}越辺川右岸0.0kの痕跡水位と現況堤防高の比較図を示す。これによると、決壊箇所付近の^{おっべ}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。また、0.0kの痕跡水位と現況堤防高の差より、推定される越流水深は最小でも約40cm以上と推定される。

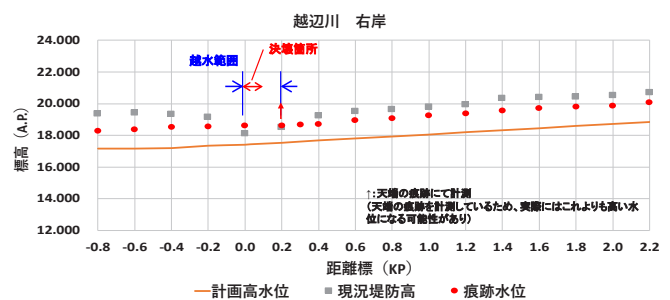
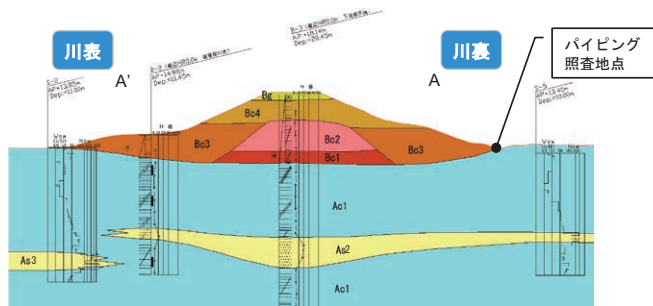


図3 ^{おっべ}越辺川右岸0.0k付近の水位と堤防高の縦断面図

また、^{おっべ}越辺川右岸0.0k付近の目視による調査によると、噴砂等は確認されていない。また、ボーリング3箇所とスウェーデン式サウンディング6箇所の土質調査を実施した結果、堤体部分は粒度分布から粘土分やシルト分の割合が多く、堤体の土質は粘性土で構成され、基礎地盤についても主として粘性土層であることが確認された。

堤防横断モデル図を次頁に示す。



土質	湿潤密度 (kN/m ³)	透水系数 (cm/s)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)	備考
Bg	18.00	2.28E-01	0.0	35	
Bc4	18.50	5.93E-05	45.0	0	
Bc3	18.50	3.00E-06	45.0	0	
Bc2	18.50	3.17E-06	45.0	0	
Bc1	18.50	1.65E-05	35.0	0	
Ac1	18.00	3.00E-06	35.0	0	
As2	18.00	2.60E-03	0.0	33	
As3	17.00	9.50E-04	0.0	28	
Ag	19.00	1.10E-03	0.0	28	

図4 越辺川右岸 0.0k の堤防横断モデル図

浸透に対する安全性照査については「河川堤防構造検討の手引き」(平成24年7月 JICE)に基づき実施した。その結果、裏のり安全率は $F_s = 3.92$ 、表のり安全率は $F_s = 3.92$ 、パイピングについては局所導水勾配 i が水平、鉛直ともに 0.00 となり、浸透に対する安全性を確保していることが明らかになった。

表2 越辺川右岸 0.0k の浸透に対する安全性照査結果

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)		
	越水終了時 10/13 2:00			$F_s \geq 1.32$	$F_s = 3.92$ (OK)	$i < 0.5$	
	水位低下終了時 10/14 4:00	$F_s \geq 1.00$	$F_s = 3.92$ (OK)			i_v (鉛直) = 0.00 (OK)	

(3) 決壊原因の推定

越辺川右岸 0.0k については、川裏堤防洗掘、川裏側への植生、フェンスの倒壊が確認された(写真1右)。また、痕跡水位は現況堤防高よりも高い(図3)。一方で、上下流の近傍も含めて噴砂や漏水が確認されていないこと、土質調査に基づく解析の結果、裏法すべりやパイピングに対する基準値を満足している(表2)ことから、越水が決壊の要因になったと推定された。

同様に表1における、1、3、4、7、8、9、10、11番の8箇所が同様の被災原因であると推定された。

3.2 久慈川左岸 27.0k における被災

(1) 被災の概要

久慈川左岸 27.0k 付近の決壊は、那珂川の緩い湾曲部外岸側に位置する。越水や決壊の詳細な時刻は確認されていない。

決壊幅は、最終的に約 100m に達している。



図5 久慈川左岸 27.0k の決壊箇所

(2) 決壊要因の検討

久慈川左岸 27.0k 決壊箇所は下流側よりも堤防高が低い(写真2左)。また、堤防川裏部の植生が川裏側に倒伏している状況や、堤防天端に越水による流木等の漂流物が残存している状況が確認された(写真2右)。



写真2 久慈川左岸 27.0k の決壊状況

久慈川左岸 27.0k の痕跡水位と現況堤防高の比較図を示す。これによると、決壊箇所は、左岸 27.0k と 27.5k の痕跡水位の間の現況堤防高が低いことより、越水範囲は左岸 27.0k ~ 27.5k と推定される。なお、左岸 27.0k ~ 27.5k よりも上流区間の痕跡水位は現況堤防高と同程度になっているが、この区間は川幅が広がったため区間全体にわたる越水は生じなかった一方で、左岸 27.0k から下流区間は川幅が狭くなるため、この付近で越水したことが推定される。推定される越流水深は 27.0k の痕跡水位と決壊箇所付近の推定堤防高より、約 55cm と推定される。

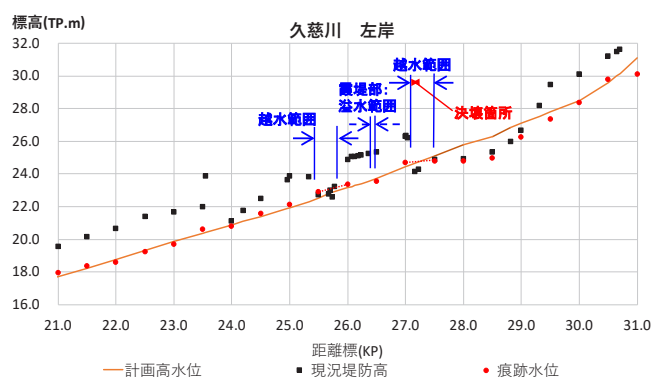


図6 久慈川左岸 27.0k 付近の水位と堤防高の縦断面図

久慈川右岸27.0k決壊区間の、決壊区間付近の川裏法尻付近は、噴砂や漏水痕は確認されていない。また、決壊箇所では1箇所と残存部下流側で1箇所の計2箇所のボーリング調査と、決壊箇所の表法尻と裏法尻で各1箇所、決壊箇所上流近傍と下流近傍の表裏のり尻の計6箇所のスウェーデン式サウンディング調査を実施した結果、堤体部分は砂分や礫分を混入する粘性土で構成され、基礎地盤は礫質土層の表層に粘性土層が分布することが確認された。モデル図を以下に示す。

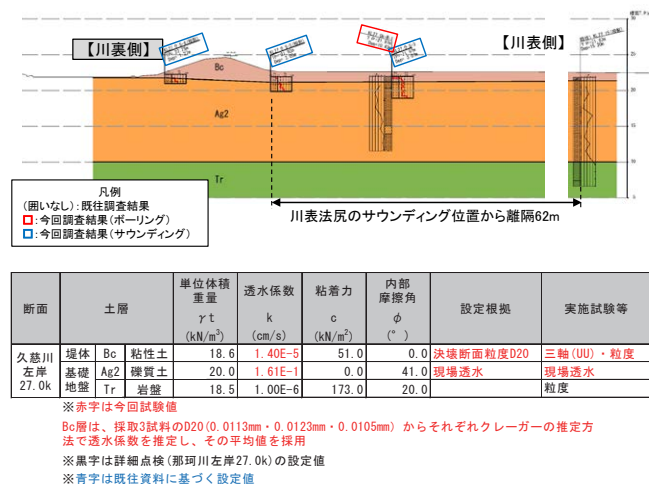


図7 久慈川右岸27.0kの堤防横断モデル図

浸透に対する安全性照査については「河川堤防構造検討の手引き」(平成24年7月JICE)に基づき実施した。照査結果の天端到達時刻等は、現場確認ではなく、設定した河川水位での時刻である。その結果、裏のり安全率は照査基準 $F_s=1.440$ に対して $F_s=5.019$ 、表のりは照査基準 $F_s=1.0$ に対して $F_s=6.553$ となり、浸透に対する安全性を確保していることが明らかになった。一方、パイピングについては、G/Wが詳細基準1.0に対して0.789となり、浸透に対する安全性を確保していないことが明らかになった。

表3 久慈川右岸27.0kの浸透に対する安全性照査結果

河川水位	時刻	すべり破壊		パイピング破壊
		川表 F_s	川裏 F_s	
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		$F_s \geq 1.0$	$F_s \geq 1.440$	$G/W > 1.0$
		: SAFE		: OUT

(3) 決壊原因の推定

久慈川左岸27.0kについては、川裏側への植生の倒伏や、堤防天端に越水による流木等の漂流物の残存が確認され、痕跡水位は現況堤防高よりも高いことが確認された。また、上下流の近傍も含めて噴砂や漏水が確認されていない一方で、土質調査に基づく解析の結果、パイピングに対する基準値を下回る値であったことが明らかになった。このため、越水が決壊の要因になったと推定される一方で、解析の結果から、

浸透の影響は排除できないと考えられる。

同様に表1における、2、6番の2箇所が同様の被災原因であると推定された。

4 被災メカニズムと堤防強化対策

4.1 被災メカニズムの推定

台風第19号による決壊箇所は、決壊箇所の痕跡水位や状況から越水が主要因であると推定される。そこで、決壊箇所と、対比のために越水したが未決壊だった箇所について、直近の危機管理型水位計等を用いて越流時間と越流水深の推定を行い、被災メカニズムの分析を実施した。

越水外力の推定方法としては、決壊箇所直近の危機管理型水位計の最高水位値と、決壊箇所の現況堤防高の差を、痕跡水位より推定された越流水深にあわせたハイドログラフを用いて、決壊箇所の推定堤防天端高との差分をとった場合の越流時間と越流水深を読み取った。

表4 未決壊箇所一覧

番号	河川名	箇所	土質		
			堤体	基礎	基盤
1	都幾川	L6.0k	粘性土	表層 粘土層	地盤 シルト
2	那珂川	R61.5k	砂質土	礫混じり砂	玉石混じり礫
3	那珂川	L19.5k	砂質シルト	シルト混じり砂	砂質土

関東地整管理河川の越水による決壊箇所(逆越水除く)と未決壊箇所の、推定した越流時間と越流水深について図8に示す(令和2年4月時点のデータのため、今後変わる可能性がある)。

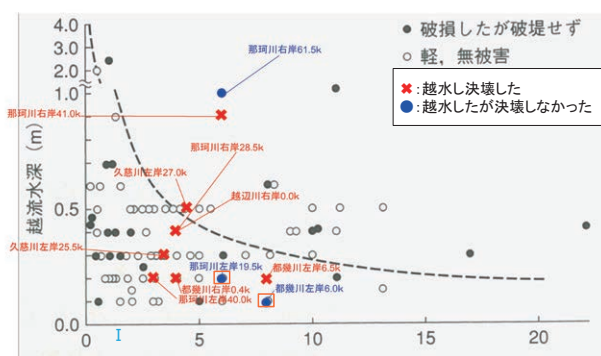


図8 今回決壊箇所における越流時間と越流水深の関係

※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。

今回決壊箇所は2/3が過去に越水しても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。これまでの研究成果では破堤する可能性が低いとされた外力で破堤するものが多数見受けられることから、越水による破堤メカニズムについては十分に解明されているとは言い難いと考えられる。

なお、越流時間が長いにもかかわらず決壊しなかった、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。また、都幾川左岸6.0kは堤防天端の舗装や裏のり尻の強化を行った危機管理型ハード対策実施箇所であることから、裏のりに何らかの対策がなされている堤防は、越水に対する抵抗性があることが示唆された。

次に、越水による外力と堤防形状の関係を見るために、越水により決壊した箇所と決壊しなかった箇所における越流速と堤防天端幅の関係を整理した。

ここで、越流速については等流流速を用いるものとし、法勾配と堤防高の要素が入る以下の式によって算定を行った。

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

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

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

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

v_f : 等流流速 h_c : 法肩の水深 h_f : 等流水深 q : 単位幅あたりの流量 i : 法面勾配 ($\sin\theta$) H : 比高 h_t : 越流水深

図9 逆越流速の算出方法

図10に結果について示す。これによると、限られたデータではあるが、越流速3m/sより大きな外力で決壊を生じていることが分かる。なお、那珂川右岸61.5kについては、堤内地が湛水したことがCCTVカメラより明らかになっている。これらから、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ことの重要性が示唆された。

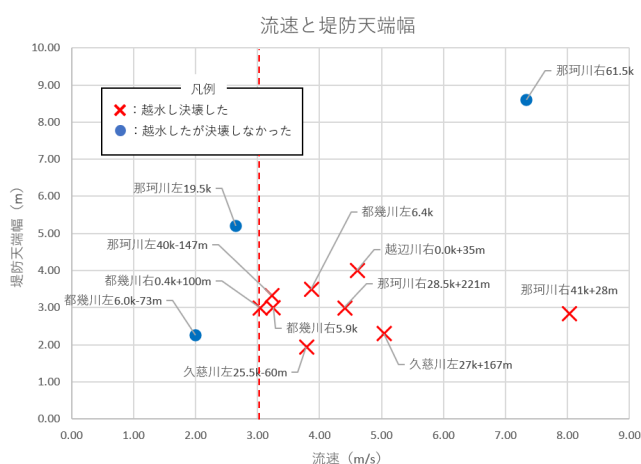


図10 越水箇所の越流速と堤防天端幅の関係

一方、越水による決壊箇所（逆越流箇所除く）と未決壊箇所の浸透の影響について確認するために、全国直轄河川の台風19号による決壊箇所と未決壊箇所の詳細点検時の浸透流解析・円弧すべり解析結果を整理した。

その結果、決壊箇所では裏のり安全率やパイピングの評価指標である局所動水勾配*i*や*G/W*が所用の基準値を下回った

箇所がないこと、決壊箇所のほうが解析結果の基準値が平均的に見て低くなるような明瞭な違いが見いだせないことから、決壊箇所における浸透の影響を見いだすことはできなかった。

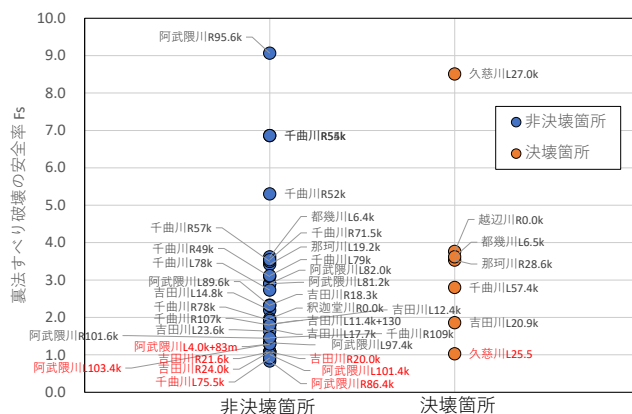


図11 越水箇所の裏のりすべり安全率の分布

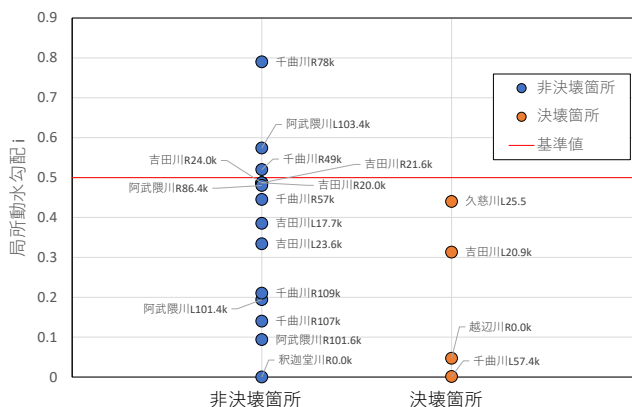


図12 越水箇所の局所導水勾配の分布

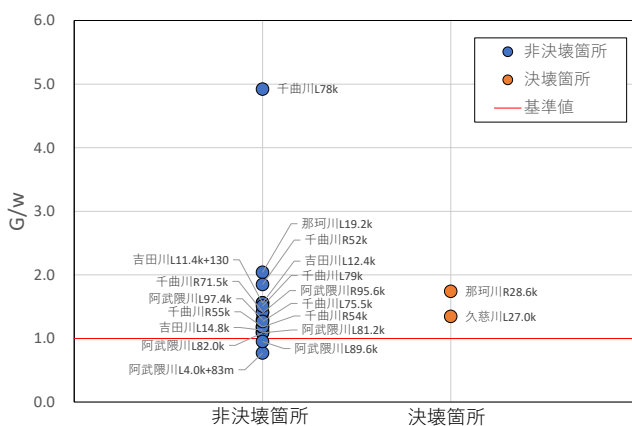


図13 越水箇所のG/Wの分布

4.2 堤防強化の基本方針

推定された被災メカニズムより、堤防強化の基本方針について示すと、以下の通りである。

- ・これまでの河道計画との整合性を図ることから、河道掘削等による水位低下を基本とする。また少なくとも計画上必

要とされる断面までは堤防を拡築する。

- ・数少ないデータからではあるが、危機管理型ハード対策実施箇所では越流時間が長くて決壊を免れていることから、堤防強化としては、危機管理型ハード対策で実施されている、堤防天端舗装や、裏のり尻補強を実施する。
- ・今回決壊箇所においては浸透の影響は大きくなかったと推測されるが、限られたデータの中での推測であること、久慈川左岸27.0kの被災箇所のように土質調査の結果を用いた解析結果からは浸透の影響は排除できない箇所もあると考えられることから、必要に応じて堤体浸透に対して遮水シートの設置や基礎地盤の遮水（矢板）等を行う。

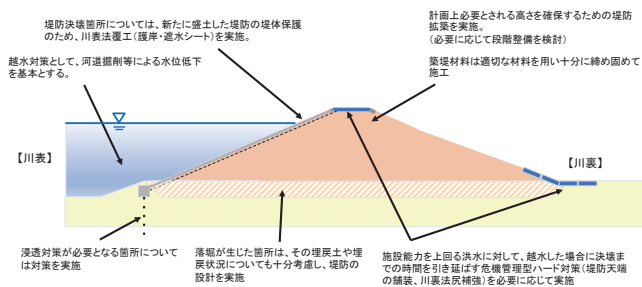


図14 堤防強化対策のイメージ図

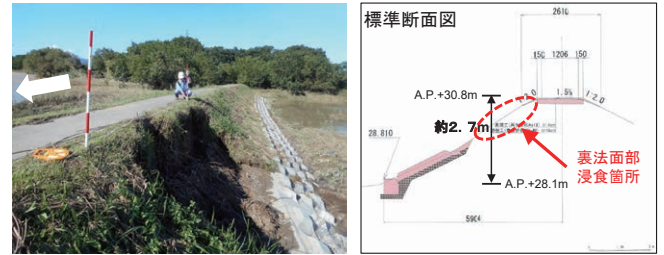


図15 都幾川危機管理型ハード対策の越水後の状況

て改善を行うことで、少ない総越流量で決壊する状況をなくすることができ、バラツキを小さくできる（信頼性を上げる）可能性があると考えられている。

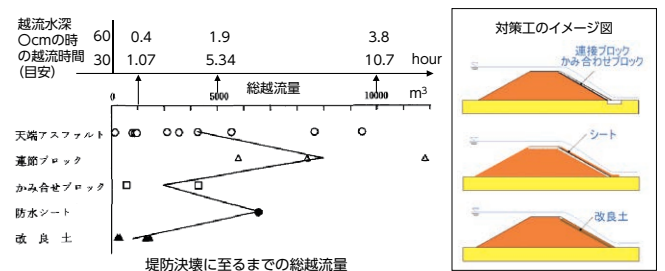


図16 過去の越水に対する裏のり対策工の効果実験結果

5 今後の堤防強化における課題

今回の台風19号による関東地方整備局管内の堤防被災について調査・分析した結果、越水が決壊の要因になったと推定されるが、前述したとおり、今回の決壊箇所では、過去に越水しても破堤しなかった外力で決壊した箇所が多数見られるため、以下のような越水決壊のメカニズムを明らかにするための調査分析が今後必要である。

- ・越流速や継続時間等の外力情報と、堤防の形状や土質等の堤防諸元等被災箇所の調査・情報の蓄積を行っていく。
- ・また、模型実験等との組み合わせによる決壊要因の継続的な調査分析。

また、対策工法としては、今回有効性が示された都幾川の危機管理型ハード対策箇所は、越水はしたものの決壊はまめがれたが、越水後の調査では、裏法面部には侵食が見られており、越水の規模によっては侵食が拡大、決壊に至る可能性が考えられる。

裏のり面の侵食に対する強化対策としては、連節ブロック、かみ合わせブロックやシート、改良土等で表面被覆を行う工法があるが、過去の大型堤防模型実験（堤高2.5m）によって検証した結果、効果を単純に比較すると、連節ブロック＞防水シート＞天端アスファルト＞かみ合わせブロック＞改良土の順となったが、同じ工法でも決壊に至るまでの総越流量のバラツキが大きく、施工や工法上の工夫、例えばブロック同士の連結方法を工夫するなど、堤防の破壊過程を踏まえ

そのためには、以下が課題として考えられる。

- ・各対策工法について、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性や実力について整理、技術的な細部を詰めていく必要がある。
- ・堤防強化を行った場合に、どこからどのような壊れ方をしたか情報を蓄積しておくことが有効で、それらの情報をもとに分析を都度おこなっておく必要がある。

また、これまで土堤原則のため堤防の強化対策工としては考えられてこなかった、鋼材やセメント系材料で堤防内部に自立型のコアを作る工法等も提案されている。

このような新たな技術も含めて堤防強化対策を考えていくためには、侵食抑制効果に加え、耐久性、設置コスト等を含めて、総合的に評価することが重要であると考えられる。

6 おわりに

台風19号による被災は、これまでにない甚大なものであったが、同時に堤防決壊については多くの知見を得ることができたのも事実である。今後、JICEではこれらのデータを活用して、堤防管理のさらなる高度化を目指し、また安全性の確保を図っていくことが重要であると考えられる。