資料-2

河川堤防の被災状況の 調査・分析について

台風第19号による被災要因

- ・台風第19号による洪水では国管理河川の14箇所・県管理河川の128箇所で堤防決壊が発生した。
- ・決壊の主要因は「越水」が86%で、被災要因の多くを占める。
- ・また、越水が確認された箇所は国管理河川で72箇所である。(内、決壊は14箇所)

※第1回検討会 資料2-3に4月10日公表の荒川水系都幾川の決壊2か所を追加し、再整理したもの



決壊の主要因が越水のうち、堤内地側からの越水 国管理河川 2事例 県管理河川 18事例 ※県管理区間の決壊の主要因は県からの聞き取りによる

被災要因の分析について

- 第1回委員会において、堤体土質、堤体表面の植生、ウォータークッション、維持管理状態について分析が必要との意見をいただいたが、土質や形状等を十分に把握できていない箇所も多いため、文献1)、2)に示すように丁寧な分析を実施するためにも今後継続して調査を行う必要がある。
 - 文献1)渡邊国広・諏訪義雄・加藤史訓・藤田光一:東北地方太平洋沖地震津波による海岸堤防の被災分析,土木学 会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.356-360, 2012.
 - 文献2) 面屋謙太・杉井俊夫・宇野尚雄: ロジットモデルによる堤防被災要因の分析, 土木学会年次学術講演会講演 概要集61(3), pp.477-478, 2006.
- 第2回委員会において、流速と越流時間が同程度なのに対し、決壊、非決壊についての分析が必要との意見を頂いたことから、次ページ以降では、直轄河川を対象として、ご指摘のあった視点で分析を行った。

※第2回検討会 資料2-1に加筆・修正し、再掲載したもの

文献1)の分析例とまとめ

表-2 多重ロジスティック回帰分析の結果

説明変数 (mean±s.d.)	係数β	p 值	標準化 回帰係数	オッズ比 (95%CI) 1.30 (1.23-1.37)	
越流水深 (5.8±3.9m)	0.261	< 0.001	1.013		
裏法尻被覆幅 (1.6±3.1m)	己被覆幅 ±3.1m) -0.264 <0.001		-0.810	0.77 (0.68-0.85)	
表法勾配1:n (1.7±1.3)	-0.328	0.004	-0.436	0.72 (0.57-0.90)	
裏法勾配1:n (1.5±0.4)	-0.982	< 0.001	-0.403	0.37 (0.23-0.61)	
比高 (3.5±1.9m)	比高 0.096 0.075 0.18 ±1.9m) 0.096 0.075 0.18		0.183	1.10 (0.99-1.22)	
天端幅m (3.6±2.3m)	0.019	0.830	0.044	1.02 (0.84-1.18)	

 a) 堤防の全壊に最も影響を与えたのは津波の越流水 深であることが確認された.しかし両者の関係は 海岸によるばらつきが非常に大きいので,防災上 の議論にあたっては本研究で示した集計値だけで なく,同じ越流水深で最も被害が激しかった事例 を包絡線等で把握しておくことも必要である.
 b) 裏法尻部の被覆,表法・裏法の緩勾配化が堤防の 全壊確率を抑制することが示された.裏法尻被覆 は最も影響が明瞭な構造要素であるので優先的に 扱うことが望まれるが,表法勾配と裏法勾配につ いては全壊と半壊で傾向が逆転するので慎重に扱 う必要がある.
 c) 比高が高くなると全壊確率が高い傾向が2群比較で 見られたが,多変量解析では統計的に有意でなか った.

文献2)の分析例 (決壊要因の分析に用いた 堤防の特性と分析結果の一例)

回数	1	2	3	4	5	6	7	回数		
要因	t值	要因	バラメータ	パラメータ						
定数項	0.58	0.47	0.94	0.35	0.84	0.05	1.65	定数項	の符号	の一致
天端幅	1.48	1.57	1.58	1.56	1.81	1.86	1.40	天端幅	負	0
表法高	0.31							表法高	Ē	0
表法面勾配	1.07	1.29	1.29	1.01	1.17			表法面勾配	E	0
裏法面勾配	0.95	1.02	1.69	1.62	1.59	1.57		裹法面勾配	負	x
堤体断面積	0.58	0.52						堤体断面積	E	×
流量比	1.23	1.36	1.50	1.53	1.77	1.90	1.74	流量比	Æ	0
c/YH	0.80	0.92	1.04					c/YH	負	0
砂	1.09	0.18	1.25	0.95				砂	負	
舗装の種類	1.20	1.36	1.57	1.50	1.66	1.73	1.44	舗装の種類	負	0
的中率	82.14	82.14	85.71	85.71	78.57	89.29	71.43	的中率		
尤度比	0.5184	0.5413	0.5118	0.5697	0.5337	0.5576	0.4452	尤度比		

既往の知見を参考にして、越水による法面侵食過程の外力と耐力を以下の通り整理した。

※第2回検討会 資料2-1を再掲載したもの



決壊・非決壊箇所の分析

- 越水による外力と決壊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時間と流速(等 流流速)の関係を整理した。
- 法尻付近での流速(裏法部の等流流速)が3m/s未満、越流時間が3時間未満の箇所で今回決壊している箇所はない。
- 既往の知見※1)によると、「流速2m/sを目安として、芝の耐侵食性は確保されている」とされている。
- 一方、今回の洪水では、法尻付近の流速が3m/s未満であれば堤防裏法面および法尻表面の耐侵食性は一定程度、確保されているものと考えることができる。
- <u>那珂川右岸41.2kと那珂川右岸61.5k(下図の赤丸)</u>は、外力が同程度であるが決壊・非決壊の違いが出ているため、土質 や形状を比較した。



※1) 福岡捷二・藤田光一・加藤善明・森田克史:堤防法面の芝の耐侵食特性,土木技術資料29-12, 1987.

那珂川R61.5k付近の水位計・CCTV位置、水位観測結果(越水後に決壊しなかった箇所)



那珂川R61.5k付近のCCTV記録1/2(越水後に決壊しなかった箇所)



令和元年10月13日 1時 4分

令和元年10月13日 0時15分

那珂川R61.5k付近のCCTV記録2/2(越水後に決壊しなかった箇所)



令和元年10月13日 1時14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

- ・ 越水開始前から堤内地が湛水し、裏法面に越
 流水が作用していた時間は短かったと推測さ
 れる。
- 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。
- 水位計から推測した最大越流水深、継続時間 だけでは、外力の大きさを適切に評価できな い場合もある。



那珂川R61.5k(越水したが決壊しなかった箇所)



・天端や裏法面(中央~法肩)に補修痕跡 ・3割近い勾配





 ・検土杖を裏法面上中下等、複数箇所で実施。
 ・押し込もうとするが、D30cm~50cmで 硬くて押し込めない。



8

・塑性があり、粘性土分も含まれる

那珂川R41.2k付近(越水により決壊した箇所)



決壊区間の下流側に、越水区

決壊区間の下流側に隣接する

残存堤防にて、調査を実施した。

間が広がっていた。

第2回那珂川・久慈川堤防調査委員会資料より



2019/10/15撮影航空写真

那珂川R41.2k(越水により決壊した箇所)



- ・川裏法面に連節ブロック
- 堤防高は低いが、急勾配(1.5~2割)



決壊箇所直下流:連節ブロックはめくれている



• 川表側の土質:61.5kに比べると細粒分 が少ない



 川裏法肩直下:間隙は砂・シルトで充填 されているものの、多くの石を含む

決壊・非決壊箇所の分析

- 那珂川R61.5kは、越流開始後早い段階で湛水したことにより裏法面は侵食作用をほとんど受けなかったと 推測できる。
- 裏法面の堤体土の状態の違いも大きい可能性がある。
- 様々な要因が決壊・非決壊に与える影響に関しては、今回の事例分析だけでは不十分であり、事例・実験等のデータの蓄積が不可欠である。
- ※分析を行う上で、湛水状況や土質等、十分な情報が得られなかった項目も存在するため、情報が得られる ような工夫、仕組みも考えていく必要がある。

	那珂川R41.2k	那珂川R61.5k
被災状況	決壊 決壊区間の下流は裏法面侵食 パンテンポ健全	非決壊 部分的に裏法面侵食 部分的に天端侵食
越流時間、水深	6時間、0.9m	6時間、1.5m以上 (湛水のために、越流水が堤体を侵食した時間と水 深はこれよりもかなり小さい)
比高、勾配	2.7m、1.5割	2.9m(※下流にはこれより高い区間が多い)、 2.8割
越水時の状況	湛水していたと推測 ※詳細は不明	・開始時も湛水 ・越水開始1時間程度で裏法面が見えなくな る程度に湛水
堤防土質 ※決壊では前後区 間	川表:砂質シルト (61.5kよりも細粒分少ない) 天端~川裏:シルト混り砂礫(石を多く含む)	川表~天端:護岸と舗装のために、調査不 能 <mark>裏法面:硬い砂質シルト</mark>
堤防構造	天端舗装 川裏法面連節ブロック (法肩保護なし)	天端舗装 川裏法面土羽植生

越水決壊に対する浸透の影響

- 第2回検討会で土質により耐侵食性(堤防の耐力)が異なるとの仮定の下、土質を代表する指標として裏法面の透水係数を採用して、透水係数と裏法流速の関係を整理したところ、透水係数が小さい箇所では決壊が少なく、透水係数が大きい箇所では決壊が多い傾向が見られた。
- 一方、浸透の影響を考えると、裏法の透水係数だけでなく、堤体内水位について確認すべきであり、<u>堤防の</u> <u>形状や水位の継続時間と裏法への浸透について、指標を用いて検討</u>すべきではないかとのご意見をいた だいた。
- そこで、越水決壊箇所のすべりやパイピングの影響をみるために、越水箇所の被災時外力を用いた浸透に対する再現解析結果や、詳細点検結果を用いて、越水箇所の浸透に対する安全性を分析した。
- また、堤体の浸透に対する影響をみるために、堤防の形状や水位ハイドロが要素として含まれている堤防 脆弱性指標t*を用いて、越水決壊と浸透の影響について分析を行った。



決壊箇所の再現解析結果(直轄河川)

- 越水による決壊箇所における被災時の外力を用いた河川堤防の浸透に対する再現解析を行い、結果を整理した。(逆越流による決壊箇所(阿武隈川L98.6k、久慈川R25.5k)を除く)
- 再現解析では、すべり破壊に対する<u>必要安全率を満足しない箇所は無かった</u>。また、パイピングに対する<u>必要安全率を満足しない箇所は</u>12箇所中2<u>箇所</u>である。
- 浸透の再現解析からは、<u>決壊に関して、浸透の影響は大きくなかった</u>と推測できる。

	すべり		パイ	イピング
	Fs	必須安全率	i < 0.5	G/W > 1.0
吉田川L20.9k	2.54	1.58	0.37	_
那珂川R28.6k	1.534	1.452	0.378	_
那珂川L40.0k	1.77	1.2	<mark>0.802</mark>	_
那珂川R41.2k	2.131	1.2	—	_
久慈川L25.5	3.864	1.44	_	1.332
久慈川L27.0k	5.019	1.44	_	<mark>0.789</mark>
越辺川R0.0k	3.92	1.32	—	_
越辺川L7.6k	4.14	1.32	_	_
都幾川R0.4k	2.95	1.32	0.07	_
都幾川R5.9k	2.06	1.45	_	6.73
都幾川L6.5k	2.52	1.32	0.05 —	
千曲川L57.4k	1.414	1.32	0.458	

再現解析結果 一覧



那珂川L40.0k パイピングOUT

既往の河川堤防の浸透に対する詳細点検結果での比較(裏法すべり)

- 決壊箇所と非決壊箇所の河川堤防の浸透に対する安全を確保するための詳細点検時における裏法すべり 破壊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、詳細点検実施のうち、裏法すべり破壊の安全率を満足しない箇所は7箇所中1箇所である。
- 非決壊箇所では、裏法すべり破壊の安全率を満足しない箇所は34箇所中8箇所である。
- ●決壊箇所と非決壊箇所で裏法すべり破壊の安全率Fsの分布に明瞭な違いは確認できない。

赤字の箇所が裏法すべり破壊の安全率を満足しない箇所



※河川堤防の浸透に対する安全を確保するための詳細点検が行われている箇所のみを分析した ※裏法部流速との関係は、越流水深が明らかで、裏法部の等流流速が算出できた箇所のみ分析した 14

既往の河川堤防の浸透に対する詳細点検結果での比較(パイピング)

- 決壊箇所と非決壊箇所の河川堤防の浸透に対する安全を確保するための詳細点検時におけるパイピング破壊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、パイピングの基準値を<u>満足しない箇所は無かった</u>。
- 非決壊箇所では、パイピングの基準値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<u>明瞭な違いは確認できない</u>。



※河川堤防の浸透に対する安全を確保するための詳細点検が行われている箇所のみを分析した ※裏法部流速との関係は、越流水深が明らかで、裏法部の等流流速が算出できた箇所のみ分析した

堤防脆弱性指標t*と外力の関係

- 決壊箇所11箇所と、非決壊箇所19箇所について、堤防脆弱性指標t*と裏法尻の等流流速の関係を分析した(図1)。
- 福岡らの研究^{※1}では、決壊した堤防のt*は0.1以上、裏法すべりが生じた堤防のt*は0.01~0.1に集中していた。
- 今回の決壊箇所と非決壊箇所ではt*の分布に明瞭な違いは確認できないが、線形判別分析で得られた境界線が傾いており、堤防脆弱性指標t*の寄与を示唆する結果が得られた。また、t*が大きな箇所で決壊幅が大きい傾向が見られる(図3)。



16

堤防脆弱性指標t*と決壊幅の関係

図3

※被災時の水位ハイドロが明らかな箇所のうち、詳細点検が実施されており、透水係数が 明らかな箇所について堤防脆弱性指標t*を算出した。

まとめ

【那珂川の決壊・非決壊箇所比較】 の越流外力が同程度の那珂川における決壊・非決壊の箇所をより詳細に比較した。

- 那珂川R61.5kは、越流開始後早い段階で<u>堤内側が湛水</u>したことにより、裏法面は<u>侵食作用を</u> <u>ほとんど受けなかった</u>と推測できる。
- 裏法面の<u>堤体土の状態(材料、密度)の違い</u>も大きく、<u>決壊・非決壊に影響</u>した可能性がある。
- 決壊箇所に比べ非決壊箇所の透水係数が低い傾向にあること(p.12)や、透水係数が低いほど決壊口の延長が短い傾向にあるというマクロ的な分析結果(p.16)と整合している。
- 今回比較した箇所においては、<u>湛水状況や堤体の状態(材料、密度)が、決壊・非決壊に影響</u>したことが推測される。

【浸透の影響】

- 〇各堤防調査委員会における詳細点検の方法(浸透流解析、円弧すべり計算)による検討結果の整理を実施した。
- 〇堤防への浸透の程度を表す代表的な指標である堤防脆弱性指標t*を用いて、決壊・非決壊 箇所を比較した。
- 決壊箇所の被災時外力における要対策との判定になった箇所は、パイピングで2/12箇所、すべり破壊で0/12と少なく、全体としては浸透の影響は大きくなかったと推測。
- 決壊・非決壊箇所の<u>詳細点検の結果を比較しても、明確な差異は認められない</u>。
- データ数が不十分かもしれないが、線形判別分析で得られた境界が傾いており、法尻の等流 流速に比べると小さいものの堤防脆弱性指標t*の寄与を示唆する分析結果も得られたことか ら、浸透の影響を完全には否定できない。
- <u>堤防脆弱性指標t*が大きいほど、決壊幅が大きくなる</u>傾向がある。

今後の課題

●決壊のメカニズム、決壊・非決壊を分ける要因把握及び堤体の湿潤状態が越流による損壊に与える影響等について、評価・分析を行うために必要な調査データの収集・蓄積が課題。

(1)堤防諸元(形状、対策、維持管理、土質等の情報)の蓄積・更新・高分解能化への対応
 ・形状、対策、維持管理等:近年のIT技術や計測技術の高度化・低廉化によって、蓄積・更新・高分解能化が可能になってきている。積極的に新しい技術を導入することによって蓄積・更新・高分解能化が実現可能。
 ・土質:一朝一夕には難しいが、調査した結果は利用しやすい形での蓄積が重要。

(2)被災箇所の調査・情報の蓄積

・今回のような分析を充実させていくためには、堤体諸元だけでなく、<u>被災箇所の外力や堤体土質の詳細などを調査し、これらを蓄積する必要</u>がある。調査・情報の蓄積は、越水決壊箇所に限った話ではなく、全ての決壊箇所、重大な侵食・浸透被災箇所、越水したが決壊しなかった箇所でも同様である。

・<u>調査や蓄積方法をとりまとめた標準的な方法を示した参考図書を作成</u>することによって、現場において対応しやすくなると 考えられる。

(3)堤体内水位

 ・ <u>決壊箇所・非決壊箇所における実際の堤体内浸潤は不明</u>であり、解析や指標等によって堤体内浸潤状況を推測せざるを 得ない状況であった。現状を改善するには、<u>堤体内水位観測を充実させること</u>が直接的かつ効果的であると考えられる。

 (例)代表的な箇所に堤体内水位観測計を設置していくことが考えられる。また、類似の洪水が発生した場合を想定し、今回の決壊・非決壊箇所の復旧箇所なども設置対象とすることも考えられる。

(4) 越水に係る模型実験等と組み合わせた研究

・実事例は複雑であるため、<u>実事例だけでなく、模型実験等と組み合わせて、決壊要因について継続的に調査・分析を進め</u> <u>る必要</u>がある。

(例) 浸潤による侵食耐力の変化などに関する研究は、今後も継続的に実施する必要がある。