

六角川水系牛津川における令和元年8月出水により越水した堤防箇所への安全度調査について

堤 隆瑛¹・下村 幸一²・梶原 徹³・櫻井 正男⁴

^{1,2,4}九州地方整備局 武雄河川事務所 工務課 (〒843-0023佐賀県武雄市武雄町昭和745)

³九州地方整備局 筑後川河川事務所 調査課 (〒830-8567 福岡県久留米市高野1-2-1) .

令和元年8月豪雨において、越水・非決壊であった六角川水系牛津川について、土質調査および植生調査を実施し、耐浸透および耐越水（侵食）の観点から非決壊の要因を分析・考察した結果を発表する。

キーワード 令和元年8月豪雨、堤防越水、非決壊、六角川水系牛津川

1. はじめに

令和元年8月豪雨では、九州北部を中心に記録的な大雨となり、多くの河川で氾濫が生じ、ここ佐賀県においても一級河川六角川において越水が発生し、甚大な被害を受けた。全国でも、近年、豪雨の激甚化・集中化により河川の治水能力を上回る洪水が多く発生しており、このような洪水に対しても、被害を出来るだけ減らすための効率的かつ効果的な対策を行うことの重要性が一層高まっている¹⁾。越水した堤防に対する調査や分析は、決壊した堤防においては、その事例が多いのに対し、決壊しなかった堤防（以下非決壊とする。）に対しては必ずしも十分とは言えない。今回の報告のように越水したが非決壊であった堤防についてその要因を分析することは、今後の対策や維持管理を行う上でも重要と考えられます。本論文では、令和元年8月豪雨において、越水・非決壊であった六角川水系牛津川について、土質調査および植生調査を実施し、耐浸透および耐越水（侵食）の観点から非決壊の要因を分析・考察しました。

2. 出水の概要

令和元年8月豪雨時において、妙見橋水位観測所・南溪雨量観測所で得られた水位・雨量のデータを図1に示す。8月26日から降り始めた雨は、越水が発生した8月28日未明までの間で総降雨量約600mm、時間最大雨量90mmを記録し、妙見橋水位については7.02mと既往最高水位を上回る水位となった。写真1が実際に越水が発生した時の写真である。近傍樋管位置で内外水位のデータでは、外水位は、堤防天端を上回り、越流継続時間は約1.5時

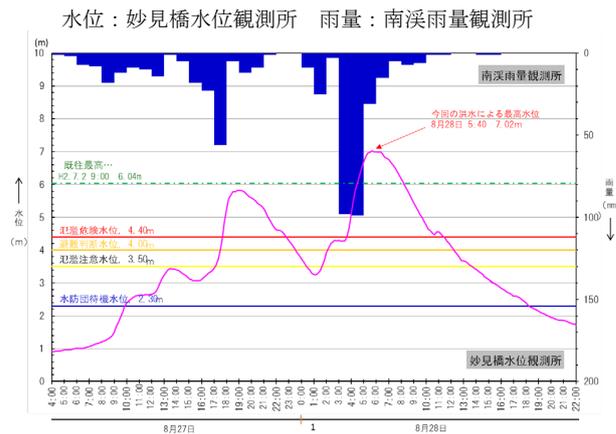


図1. 水位・雨量の時系列



写真1. 越水時の状況（牛津川左岸12k250）

間であったこと、内水位は越流開始時において約0.4m程度、最大で約1.6m程度であったことが確認される。一方、

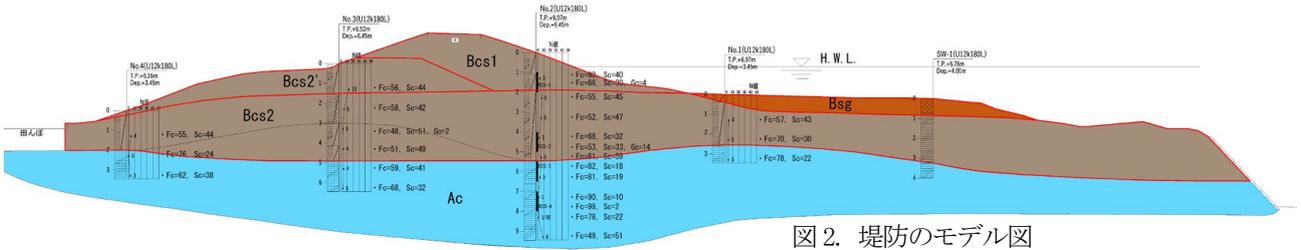


図2. 堤防のモデル図



堤内側の植生は堤防法線直角方向に倒伏

写真2. 越水後の堤防状況

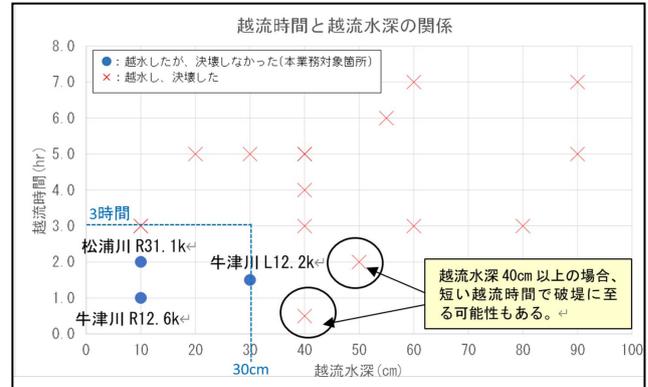
当該箇所における堤防は、堤防高が約4.5m、川裏法面勾配は約2.7割の小段を有する形状であり、被災時には、植生が繁茂していたこと、被災後の状況写真より、繁茂していた植生が倒伏している状況であったが、侵食を受けた痕跡は確認されていない（写真2）

また、既往越水事例を見るとほとんどの事例は越水時間3時間以上であるのに対し、今回の事例は1.5時間程度と比較的短時間であることがわかる（例1）

3.浸透に対する安全性評価

(1) 土質定数の設定

越水時における堤体内の浸潤挙動の把握を目的に、土質調査を実施し、浸透流解析へ反映させた。ここで、堤防の耐浸透性評価では、土性に応じた3通り（礫質土、砂質土、粘性土）の関係を不飽和特性として設定している2)ため、実際の不飽和特性と異なる可能性がある。本論文では、堤体土について保水性試験を実施した。堤防のモデル図を図2に、設定した土質定数一覧を表1に示す。ここで、堤体土は粘性土であるのに対し表層部は植生が繁茂しているため、表法面の堤体土の飽和透水係数 $4.95 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ に対して表法面の表層部の飽和透水係数は $2.44 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ と、堤体土の係数より2オーダー程度透水性が高い結果となったことから、表層部を堤体部と分



例1. 越流時間と越流水深の関係

区分	記号	土質名	N値	単位体積重量		せん断強度		飽和透水係数	不飽和特性
				$\gamma_s (\text{KN/m}^3)$	$\gamma_{sat} (\text{KN/m}^3)$	内部摩擦角 $\phi (^{\circ})$	粘着力 $c (\text{KN/m}^2)$		
表層	-	表法面	-	盛土層と同様の設定値				2.44×10^{-4}	保水性試験
	-	裏法面	-	盛土層と同様の設定値				3.79×10^{-4}	
盛土	Bcs1	粘性土	3	18.8	18.8	0	45.5	4.95×10^{-6}	保水性試験
	Bcs2	粘性土	4	18.2	18.2	0	20.2	6.96×10^{-6}	保水性試験
	Bcs2'	粘性土	4	18.2	18.2	0	20.2	1.00×10^{-6}	保水性試験
	Bsg	礫質土	3	20.0	21.0	40	0.0	1.0×10^{-2}	手引き(礫質土)
沖積層	Ac	粘性土	2	16.5	16.5	0	31.9	2.85×10^{-7}	手引き(粘性土)

表1. 土質定数一覧

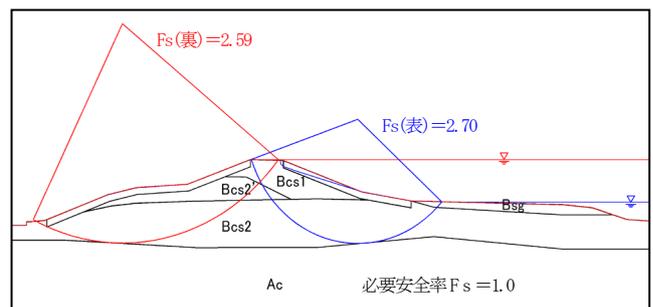


図3. 円弧すべり結果

けてモデル化を行った。また、今回算出した土質定数については、当該堤防に孔内水位計を設置し、観測データの再現計算により、設定した土質定数の妥当性を確認している。

(2) 耐浸透性の評価

越水時に観測された降雨・水位条件を外力条件として、

浸透流解析を実施した。浸透に対する安全性の評価については、当該堤防が粘性土堤防であること、基礎地盤も粘性土であり、被覆土層厚が3mを超えることから、浸透破壊に対する評価は除外し、すべり破壊のみを対象とした。川裏側すべり、川表側すべりに対して最も厳しい水位を対象に、すべり検討した結果を図3に示す。必要安全率 $F_s=1.0$ として照査した結果、川裏の安全率は2.59、川表の安全率は2.74となり、所要の安全性を満たす結果となった。堤体が粘性土であること、表層部の透水性が高いことから、降雨の影響により浸潤面が大きく上昇する結果となるものの、当該堤防が粘性土であること、及び堤防の法面勾配が緩いことから、所要の安全性を満足する結果となる。

越流水深 (cm)	等流流速 (m/s)	摩擦速度 (m/s)	平均根毛量 (g/cm ³)
30	2.4~3.7	0.32~0.53	0.02

表2. 根毛量調査結果

4. 越水に対する安全性評価

越水による侵食に対するこれまで安全性の評価は、摩擦速度 u_*c に基づく植生の表面侵食耐力による評価と、侵食限界流速 V_c に基づく堤体土の評価が実施されてきている3)。これらの2通りの評価を行うため、根毛量調査および引張り破壊試験を実施した。

(1) 根毛量調査結果による評価

当該堤防の植生を越水時と同様の時期に調査した結果、第1法面でセイバンモロコシ、第2法面でセイタカアワダチソウであり、植生高はともに130cmであった。根毛量は深さ4cm以深で減少傾向となったことから、根毛量が安定していた3cmを許容侵食深とし、平均根毛量は0.02gf/cm³とした。一方、摩擦速度は、幅広水路上の流路を仮定し、マンニングの平均流速公式を用いて算出した谷瀬ら4)の方法を用いるが、流速算出時の粗度係数を0.03（高水敷の草地相当）、0.06（草地の倒伏状態相当）5)の2通りとし、摩擦速度算出時の粗度係数を一律0.03とすることで、高茎草本により流速低減している場合での摩擦速度の評価を試み、摩擦速度0.32~0.53m/sを得た（表2）

過年度文献によって提案されている、根毛量および摩擦速度と、侵食の継続時間の関係2)に、本調査結果を反映させたものを図4に示す。

結果図より、摩擦速度の計算値0.32~0.53m/sは、耐力約0.19m/sを上回ることから、表面の耐侵食力を満足しない。一方、現地状況より表面部の侵食が確認されていないことから、越水時に植生が倒伏し、地表面を覆ったことで、侵食を防いだことなど、他の要因も考えられる結果となった。

(2) 引張り破壊試験結果による評価

侵食限界流速を推定するために、当該堤防の川裏法面において、堤体土の引張り破壊試験を実施した。試験は、

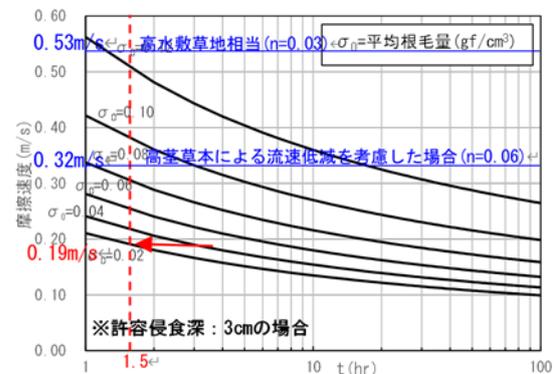


図4. 根毛量と摩擦速度の関係

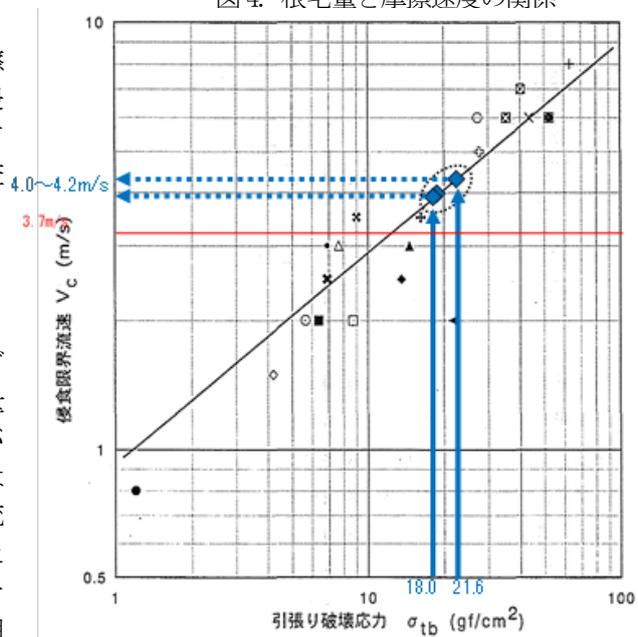


図5. 引張り破壊応力と侵食限界流量の関係

文献3)が示す方法に準じ、根毛の影響を除いたうえで、10cm角の供試体を作成し、引張り破壊応力を測定した。試験結果を引張り破壊応力と侵食限界流速の関係にプロットし（図5）、侵食限界流速を推定した結果、侵食限界流速は、4.0~4.2m/sとなり、等流を仮定した流速2.4~3.7m/sよりも大きいことから、堤体土は十分な耐侵食性を有していたと判断できる。

5. まとめ

本調査にて得られた越水・非決壊の要因分析結果を以下に示す。

- 越流継続時間が約1.5時間であり、既往の越水決壊事例1)（概ね3時間以上）よりも短かった。
- 堤体土が粘性土であるため、堤体内の水位は上昇する

ものの、浸透に対する所要の安全性を十分に確保していた。

・根毛量調査結果より、植生表層部の耐侵食性が確保されない結果となるものの、表層部の侵食は確認されていないことから、植生が地表面を覆ったことなどにより、侵食防止となった可能性が考えられる。

・堤体土の侵食限界流速は、等流を想定した流速よりも大きく、十分な耐侵食性を有していた。

今回のような事例は今後一切無いことが望ましいが、これからの河川における堤防強化のため、また技術の進展に向け、同様の調査・評価を決壊箇所のみならず、非決壊箇所においても実施することが重要であると考え。

参考文献

- 1) 令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会 報告書、2020.8
- 2) (財)国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）、2012.2
- 3) 宇多ほか：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動，土木研究所資料第3489号、1997
- 4) 谷瀬ほか：平成28年8月洪水により被災した常呂川堤防の植生からの耐侵食評価，第61回北海道開発技術研究発表会、2018
- 5) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，2002.2