

河川砂防技術研究開発【成果概要】

① 研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属		役 職
		しみず よしひこ 清水 義彦	群馬大学大学院理工 学府 環境創生部門		教授
②技術研究 開発テーマ	名称	河床変状に伴う横断構造物の破壊過程の把握と補修基準設定に関する研究			
③研究経費（単位：万円） ※端数切り捨て.		平成29年度	平成30年度	平成31年度	総 合 計
		911 万円	1, 092 万円	997 万円	3,000 万円
④研究者氏名（研究代表者以外の研究者の氏名，所属・役職を記入下さい．なお，記入欄が足りない場合は適宜追加下さい．）					
氏 名		所属機関・役職（※令和2年3月31日現在）			
鶴崎 賢一		群馬大学 大学院理工学府 環境創生部門 准教授			
斎藤 隆泰		群馬大学 大学院理工学府 環境創生部門 准教授			
安田 浩保		新潟大学 自然科学研究科 環境科学専攻 准教授			
須藤 達美		パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 河川部 部長			
渡邊 武志		パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 河川部 副部長			
北野 和徳		パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 河川部 技術課長			
市山 誠		パシフィックコンサルタンツ株式会社 本社 事業強化推進部 技術研究センター 技術理事			
片山 直哉		パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 河川部 技術課長			
樋口 敬芳		パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 河川部 課長代理			
吉武 央気		パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 河川部 技師			
砂川 透吾		パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 港湾部 技師			
坂野 アイカ		パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 河川部 技師			
⑤研究の目的・目標（様式河水-1、河水-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい．） 全国の多くの河川で河床低下が進んでいる。 床止め工の設計は，供用後に，護床工より下流側に新たに発生する落差に対応することを想定していない。 床止めの維持管理の実務において，下流河床の低下による変状破壊過程を踏まえて健全度を判定し対策の優先度を検討する技術の開発は喫緊の課題である。 堰・床止め等の河川横断構造物の劣化・損傷・破壊のプロセスのうち，河床低下に起因して洪水時に急激に破壊が進展する破壊メカニズムを把握し，「破壊限界」を予測する技術を開発する。 対象とする局面は，下流河床低下により護床工が破壊している状況で，対象とする構造形式は，タイプⅠ（水平堰）である。					

⑥研究成果 (具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

1. 変形・破壊の過程の事象の抽出

A川床止めの事例では洗掘, B川堰の事例では掃流・吸出し, C川堰の事例では浸透に関する素事象を抽出し, 洗掘・掃流・吸出し・ブロック力学変状・浸透などの破壊機構別に分類した. 各々の素事象について, 機能低下と対策必要性に着目して健全度を区分し, 素事象の発生順序を整理した. 破壊機構が変化する分岐, 事象が進行するか安定(平衡)に至るかの分岐点を検討した. 洗掘孔先行型・掃流および負圧吸出し卓越型・浸透卓越型, ならびに全事象網羅版のフォルトツリー(仮説案)を構築した. フォルトツリーの各マークは, 事例があるもの, 既往研究があるもの, 実験で確認したもの, 現時点で仮説を立てたものを区分し, 現時点の技術的課題が俯瞰できるようにした.

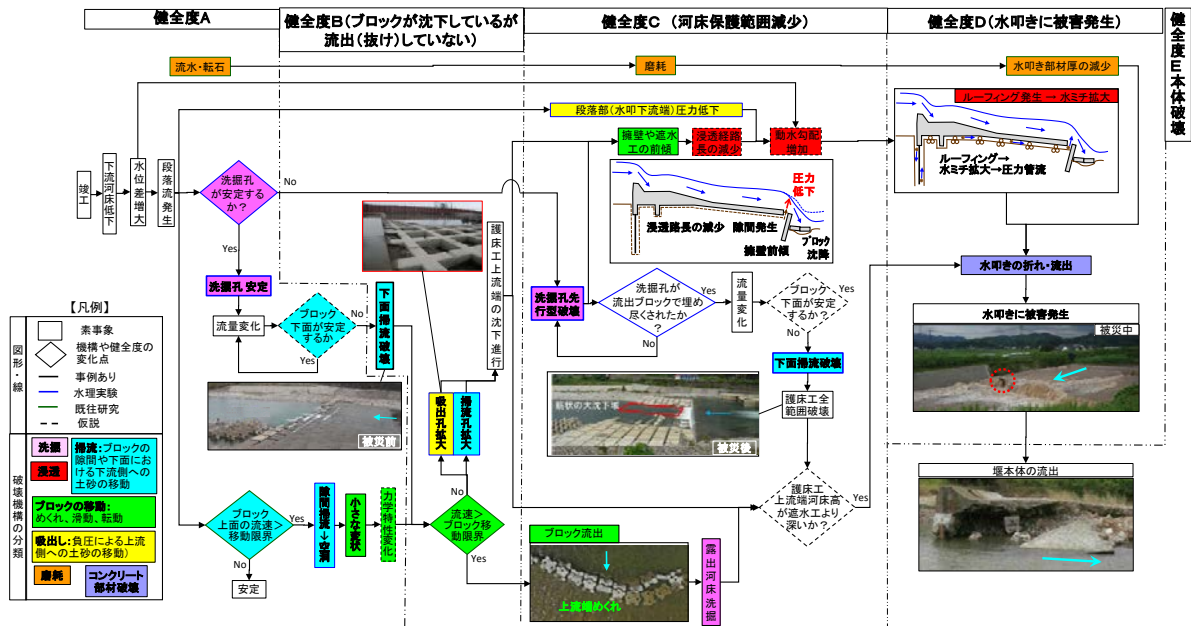


図-1 全事象網羅 フォルトツリー (仮説案)

2. 水理模型実験

水理模型実験により, 下流河床低下量が大きい場合, 比較的小さい流量によって下流側から護床工が流出していくメカニズムが明らかになった. メカニズムを次に示す.

①初期状態では, ブロック間からの砂の吸い出しが少ないため, ブロック下流端で段落ち流れが生じ, 河床の洗掘が進む. ②その影響で, ブロック下流端から順に転倒・破壊が進む. ③流量がある程度大きくなると, 護床ブロック上で跳水が発生し, 跳水始点の洗掘が進む.

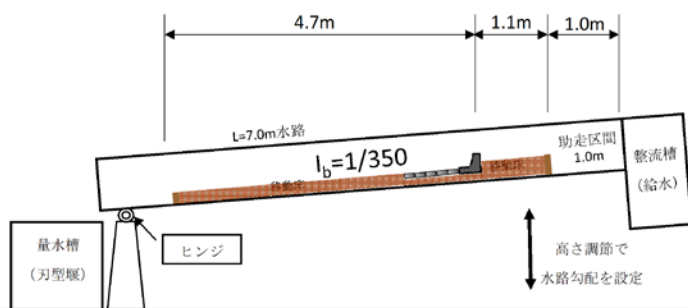


図-2 実験水路模式図 ※寸法は全て模型値

表-1 模型諸量の比較 (フルード相似則)

項目	条件	原型値	模型縮尺 1/S		
			80	100	120
河道延長	L(m)	500	6.3	5.0	4.2
河道幅	B(m)	40	0.50	0.40	0.33
河床材料	d(cm)	7.60	0.10	0.08	0.06
水深	h(cm)	346	4.3	3.5	2.9
水面勾配	I	0.00286		0.00286	
流量	Q(m³/s)	480	0.0084	0.0048	0.0030
流速	V(m/s)	3.46	0.39	0.35	0.32
粒子の空中比重	ρ_s	2.65		2.65	
粒子の水中重量	$\rho_s - 1$	1.65		1.65	
水深粒径比	h/d	46	46	46	46
フルード数	Fr	0.59	0.59	0.59	0.59
摩擦速度(掃流力)	$U_{*}(cm/s)$	31.1	3.5	3.1	2.8
無次元掃流力	τ^*	0.079	0.079	0.079	0.079
無次元掃流力比	$\tau^* r$	—	1.0	1.0	1.0
沈降速度	$\omega_0(cm/s)$	104	13.2	11.4	9.8
掃流力/沈降速度	U^*/ω_0	0.30	0.26	0.27	0.29
掃流力/沈降速度比	$(U^*/\omega_0)_r$	—	1.14	1.10	1.03
粒子レイノルズ数	Re _s	23421	32.7	23.4	17.8

3. 粒子法連成解析モデルの構築

本研究では、堰や床止めなどの河川横断構造物の破壊現象を評価可能なモデルを構築するため、E-MPS法とDEMのカップリングモデルによる流体・土砂・ブロックの連成解析モデルを構築した。本モデルは改良の余地を残すものの、計算結果で得られた護床工下流の洗堀の進行、護床ブロックの流出過程は実験で確認された現象と同様であり、本モデルにより護床工の破壊現象を再現できることが示された。

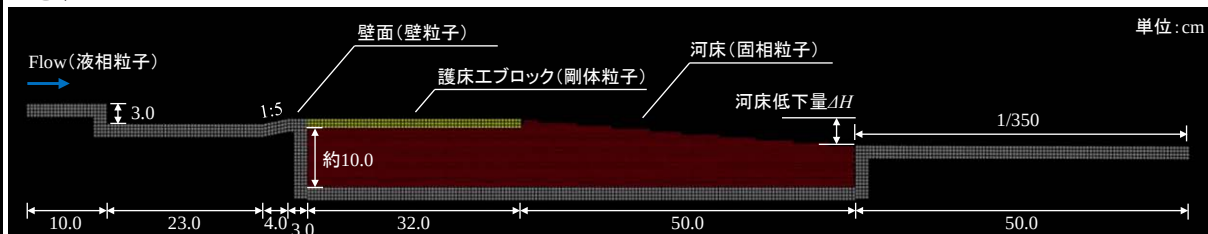


図-3 計算モデル

表-2 実験と計算の比較 (Case1: 単位幅流量0.006 m²/s, 下流河床低下量2cm)

実験	計算結果
実験 Case2 (ΔH=2cm): 通水 5 分後 	計算 Case1 (ΔH=2cm): 計算 1 分後
実験 Case3 (ΔH=4cm): 通水 5 分後 	計算 Case2 (ΔH=4cm): 計算 1 分後

表-3 実験と計算の比較 (Case2: 単位幅流量0.006 m²/s, 下流河床低下量4cm)

実験 (Case3: ΔH=4cm)	計算結果 (Case2: ΔH=4cm)
通水 54 秒後 	計算 6.4 秒後
通水 55 秒後 	計算 6.7 秒後
通水 63 秒後 	計算 13.3 秒後
通水 5 分後 	計算 1 分後

4. 準3次元解析

H23年に発生した中規模出水で被災した黒部川愛本床止工（13.2k付近）を対象として準3次元解析を実施し、水路中央部（常水路下流）に2倍程度の流水が集中していたことが明らかになった。実河川における破壊現象を解明するにあたり、流れの3次元性に留意する必要が示唆された。

5. 閾値の定量化の検討

管理指標として下流河床低下量とブロックの傾きを設定した。

下流河床低下量については、数値実験により、破壊限界曲線（下流河床低下量 ΔH ～単位幅流量 q 関係）を求めて次のように閾値を示した。

下流河床低下量が限界低下量 ΔH_c 以上となっていたら、近々に破壊する可能性が高いため、予防保全的に対策を実施する。下流河床低下量が限界低下量の半分以上（ $\Delta H_c/2$ ）となったら破壊する可能性があるためモニタリングを強化する。ここで「限界低量 ΔH_c 」は、小さい流量で洗掘先行型破壊が生じる河床低下量とした。

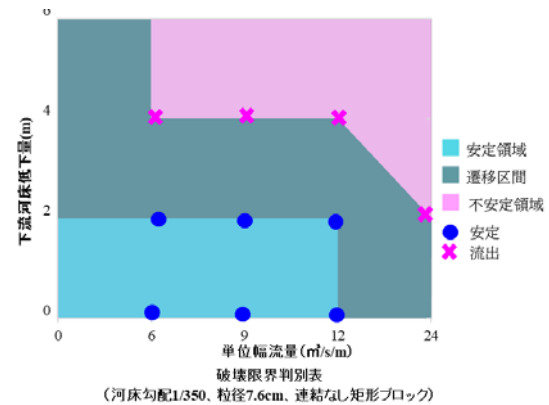


図-4 破壊限界曲線（解析条件：河床勾配 1/350、粒径 7.6cm、連結なし矩形ブロック）

表-4 数値実験結果

単位幅流量 q	0.012 m^2/s	非破壊	非破壊	破壊
	0.009 m^2/s	非破壊	非破壊	破壊
	0.006 m^2/s	非破壊	非破壊	破壊
		0.00 m	0.02 m	0.04 m

Velocity Magnitude (m/s)

0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0

下流河床低下量 ΔH

※計算1分後の流況、河床状況、護床ブロック状況を示している。

ブロックの傾きに関する数値解析の結果、仰角が 5° 以上となった時点で、回転（メクレ）に対する安全性が損なわれることが明らかになった。

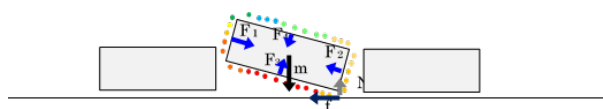


図-5 ブロックに作用する荷重図

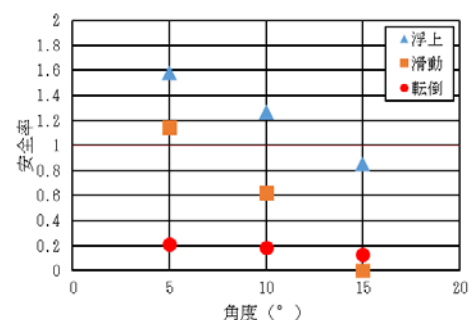


図-6 ブロックの傾きによる安定性の変化

6. フォルトツリーの精緻化

フォルトツリーの分岐ブロックは、今の破壊機構から次の状態への移行、および、安定と破壊のどちらに移行するか破壊限界といった進展メカニズムを示している。水理模型実験の結果や解析で得られた知見、過年度の破壊限界の検討結果をもとに、分岐ブロックを精緻化した。

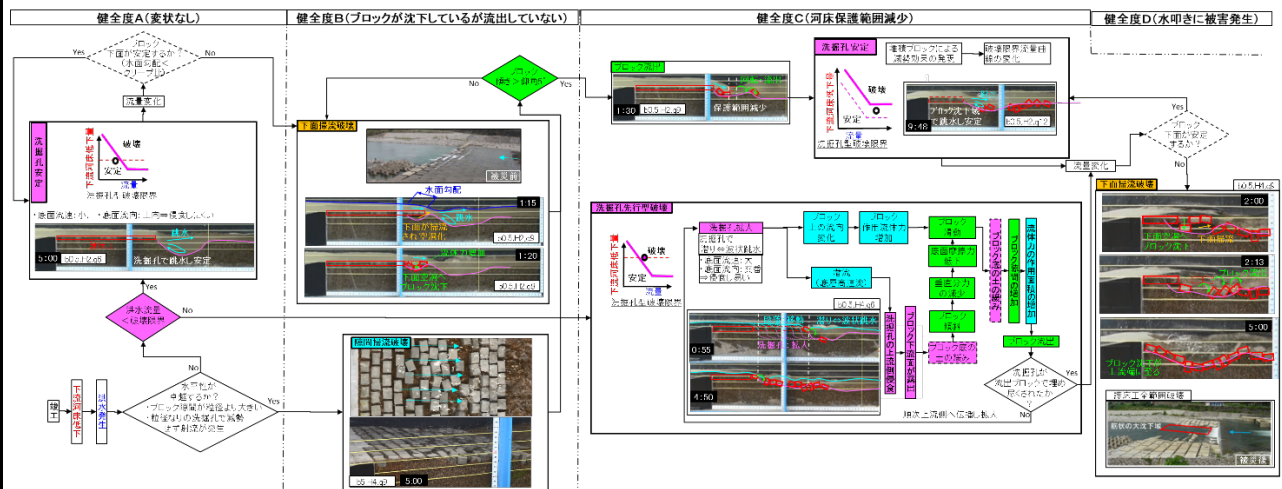


図-7 A川床止めタイプ（精緻化対象）

7. 変状進展メカニズムを考慮した維持管理計画への応用の検討

破壊の主要因である洗堀先行型破壊に焦点をあてて管理指標を検討した。従来であれば施設の各部位の状態により維持管理していた。

しかし、本研究で「管理指標としての下流河床低下量」の知見を得たことにより、今後、横断構造物を予防保全的に維持管理することが可能となる。また、破壊限界流量により各施設の破壊確率を評価でき、複数の施設の点検や対策の優先度を横並び評価することができる。

表-5 健全度、管理指標、閾値、対策

健全度	現状把握の管理指標	予防保全の管理指標	閾値	対策
A 変状なし	構造自体に変状なし		—	—
B 要監視	護床工に変状あり。 	護床工が破壊する可能性が生じている。 	①下流河床低下量 > 限界低下量の1/2(検討例2m) ②傾き < αc(検討例: 仰角5°) ③ブロック段差: 河床露出なし	—
C 護床機能低下	護床工の機能(河床保護機能)が低下している。 	現時点で護床工の機能は低下していないが、急激に破壊する可能性が高い。 	①下流河床低下量 > 限界低下量(検討例: 4m) ②傾き ≥ αc(検討例: 仰角5°) ③ブロック段差: 河床露出 ④水叩直下段差 ≤ 遮水矢板長	●段差部分へ根固め投入
D 水叩機能低下	・護床工の全範囲が変状している。 ・水叩きの機能が低下している。 		④水叩直下段差 > 遮水矢板長 ⑤水叩き上面: クラックや傾きが発生(下面空洞を示唆)	●深掘部への根固め投入 ●根継矢板
E 本体機能低下	堰本体の機能(高さ・遮水)が低下している。 		—	●本体工の新設

【「F S 研究（新規課題）」の場合記載】

⑦一般研究にむけた実施計画

（一般研究へ移行した場合の今後の研究開発の実施計画を具体的かつ明確に記入下さい。2ページ程度。）

—

【「一般研究」の場合記載】

【「F S 研究（新規課題）」の場合記載】 【非公表】

⑧研究成果の発表状況・予定

（本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。）

【発表状況】

- ・樋口敬芳, 片山直哉, 野口豪気, 斎藤隆泰, 清水義彦: 粒子法を用いた段落ち部における波状跳水・潜り噴流のシミュレーションと実験による検証, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 74, No. 5, pp. I_661- I_666, 2018.
- ・樋口敬芳, 野口豪気, 斎藤隆泰, 清水義彦: 粒子法を用いた開水路における矩形ブロックの流出シミュレーション, 第46回土木学会関東支部技術研究発表会.
- ・樋口敬芳・北野和徳・片山直哉・須藤達美・斎藤隆泰・清水義彦: 移動床水理模型実験と粒子法による河床低下に伴う床止めの破壊現象の把握, 河川シンポジウム 2019.
- ・北野和徳・片山直哉・須藤達美・坂野アイカ・樋口敬芳・清水義彦: 下流河床の低下に伴う床止めの破壊の過程のフォルトツリー構築の試み, 河川シンポジウム2019.

【投稿・発表予定】

- ・TAKAYOSHI HIGUCHI, TAKAHIRO SAITOH, YOSHIHIKO SHIMIZU: FLUID-SOLID MUTIPHASE NUMERICAL SIMULATION ON LOCAL SCOUR BELOW A WEIR USING COUPLING METHOD OF E-MPS AND DEM, 22nd IADH-APD CONGRESS 2020 IN SAPPORO, JAPAN

【「一般研究」の場合記載】

⑨研究成果の社会への情報発信

（ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。）

なし

【「一般研究」の場合記載】

⑩表彰、受賞歴

（単なる成果発表は⑧⑨に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。）

なし

【「一般研究」の場合記載】

⑪研究の今後の課題・展望等

（研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。）

- ・本研究で焦点をあてた「洗掘孔先行型破壊」の機構については一つの河床勾配と粒径とブロック形状の条件に対して破壊限界曲線・管理指標・閾値を見出すことができたが、他条件についても知見を蓄積する必要がある。
- ・計算モデルについては、計算の高速化や前章で述べた再堆積現象等、護床ブロックの形状、配置、構造の考慮等、改良の余地は残されている。
- ・掃流型や浸透型など他の機構と素事象をフォルトツリーで整理しており、今後、これらについても検討する必要がある。

【「一般研究」の場合記載】

⑫研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

- ・破壊要因分析への活用
フォルトツリーや粒子法による数値解析により、新規の設計時には河道特性から想定される破壊要因の特定と設計上の対策の検討が可能になる。
- ・事後保全対策から予防保全対策への移行
従来は状態把握（見た目の変状）の管理指標により維持管理を実施しているため、対策の実施が事後保全的である。本研究で得た管理指標の「下流河床低下量」を用いることにより護床工の破壊が生じる前に対策を実施する予防保全的な維持管理へ移行できる。
- ・定量的な優先度評価
本研究で得た知見の破壊限界曲線を用いて「下流河床低下量」から破壊限界流量を算定すると、その流量は確率規模を表す。複数の施設の危険度を確率規模で横並び評価できる。
- ・上記の結果が新設設計の手引きや維持管理計画の要領等に反映されれば、構造物の長寿命化や老朽化構造物の破壊に伴うリスクの低減（洪水に伴う社会的コストの低減）に役立つと考える。