

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

A STUDY OF APPLICATION OF FAULT TREE ANALYSIS FOR
DESTRUCTION PROCESSES OF GROUNDSILLS UNDER RIVER BED
DEGRADATION

北野和徳¹・片山直哉²・須藤達美³・坂野アイカ⁴・樋口敬芳⁵・清水義彦⁶
Kazunori KITANO, Naoya KATAYAMA, Tatsumi SUTOU, Aika BANNO
and Yoshihiko SHIMIZU

¹非会員 工修 パシフィックコンサルタンツ (株) (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)

²非会員 工修 パシフィックコンサルタンツ (株) (〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)

³フェロー会員 工博 パシフィックコンサルタンツ (株) (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)

⁵正会員 工修 群馬大学大学院 理工学府理工学専攻博士後期課程 (〒376-8515 桐生市天神町1-5-1)
兼 パシフィックコンサルタンツ (株) (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)

⁶正会員 工博 群馬大学大学院教授 理工学府環境創生部門 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

Estimating structural soundness of groundsills based on their destruction processes under river bed degradation is an urgent problem in river management. In this paper, we conducted case study analysis and hydraulic experiments to reveal elementary events. Next, we describe the order of destruction mechanism. Then, fault tree analysis is applied for destruction processes of groundsills. The present result suggested practicability of fault tree analysis for river management work, and several elementary events of destruction processes that required further research.

Key Words : *Fault tree analysis, groundsill, sill, scour hole, bed load, seepage, case study analysis, hydraulic experiment*

1. 序論

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。

床止めの破壊機構は福岡¹⁾など多くの既往研究がある。破壊の全ての過程・機構・健全度を網羅した研究は中川²⁾ら³⁾がある。本報告は、床止めの破壊の過程の全貌を網羅することを目的として、被災事例分析と簡易水理模型実験を実施し、破壊過程で生じる素事象を抽出し、発生順序と破壊機構を検討し、健全度を反映したフォルトツリーを構築した試みである。

フォルトツリーの構築のために立てた仮説は現状の課題の裏返しであり、今後必要な研究の把握に益すると考え紹介する。

2. 被災事例の分析

(1) A川床止め

平均年最大流量程度の洪水により護床ブロックの全範囲が被災した。数年前のより規模が大きい洪水では被災しなかった。この間に下流側河道の河床低下が進行したことが被災のキッカケと考える。護床工の下流側のブロックは下流側へ流出し、護床工の水叩き側のブロックは沈下した。被災ブロックはいずれも傾きが大きい。本事例は後述する連結なしブロックの水理模型実験での発生事象を分析し、下流側から破壊する条件を見出した。

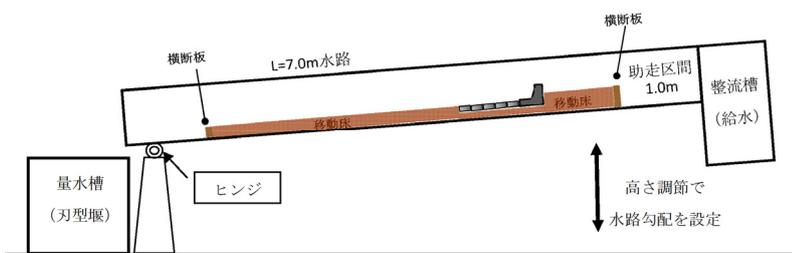


図-1 水理実験模型

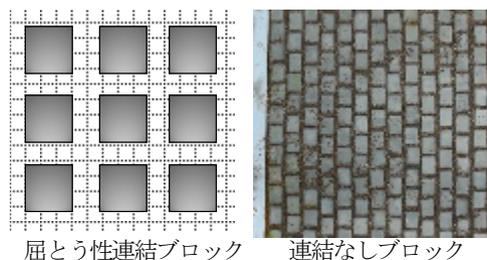


図-2 実験でのブロック平面配置



図-3 簡易水理模型実験で確認した吸出し現象

(2) B川堰

B川堰はゲートを中間開度運用しアンダーフローにより、ブロックの沈下とめくれが別の年に生じた。本事例では主に掃流・吸出しに関する素事象を抽出した。

(3) C川堰

C川堰は下流側の固定堰が撤去されたために下流側の水位が低下し、堰の上下流水位差が増えた。水叩き本体が部分的に破断し堰の右岸側が全破壊した。本事例では浸透に関する素事象を主に抽出した。

3. 簡易水理模型実験

(1) 実験内容

A川床止めの現地形状に対し模型縮尺1/100の2次元移動床水理模型実験(図-1参照)により護床ブロックの変形と破壊の過程を分析した。ブロックの連結は有り無し(図-2参照)を検討した。実験ケースを表-1に示す。連結ありの場合は連結に屈とう性の有り・無しの2とおりを検討した。実験水路の幅は40cm、全長は7mで、水路模型の下流側の河床に設置した横断板の高さを変化させることで下流側の河床低下量を設定した。河床勾配は 1/350、粒径は0.76mmとした。

表-1 実験ケース

No	ブロックの諸元			河床低下量 [cm]	単位幅流量 [L/s/m]
	連結	形状 [cm]	隙間 [mm]		
1	連結有り	幅2.0×長2.0×厚0.2	2.0	4	12
2	連結無し	幅2.5×長1.9×厚1.3	5.0	2	6→9→12
3			0.5	4	
4					

(2) 屈とう性連結ブロック実験結果

護床工上面では水が下流に向かって流れ、護床工下面では砂が上流に向かって移動した。護床工下で砂が移動すると空洞が生じ、空洞が拡大すると護床工が沈下する。これを繰り返し護床工の沈下が進む(図-3参照)。屈とう性なしブロック実験では吸出しは発生せず掃流が発生したため、連結ブロックの屈とう性は吸出しの発生と因果関係がある。負圧発生点を観察すると「吸込み」を連想しその影響範囲は局所的であると考える。屈とう性が無いブロックは一枚の板のように水面と河床を分断し、負圧発生地点と河床を隔てるので負圧の影響範囲が河床に及ばないためと考える。

隙間が小さく護床工下の砂に表面流は作用しないため、護床工下の砂を移動させた外力は圧力差であると考え。

本模型での土中の流脈線は水叩きと護床ブロックの境目に集中し(図-4参照)、ここに低い圧力が分布し、これが護床工下の砂を動かしただけでなく、水叩き下の土中の浸透に影響を与えたと考え。

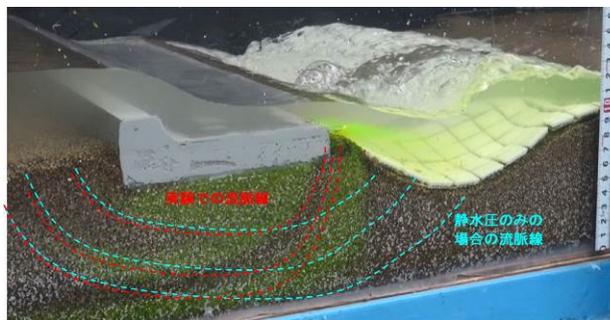


図-4 浸透流の流脈線

(3) 連結無しブロック実験

連結無しブロック実験結果は後述するA川床止めフルツリー(図-5参照)にて説明する。

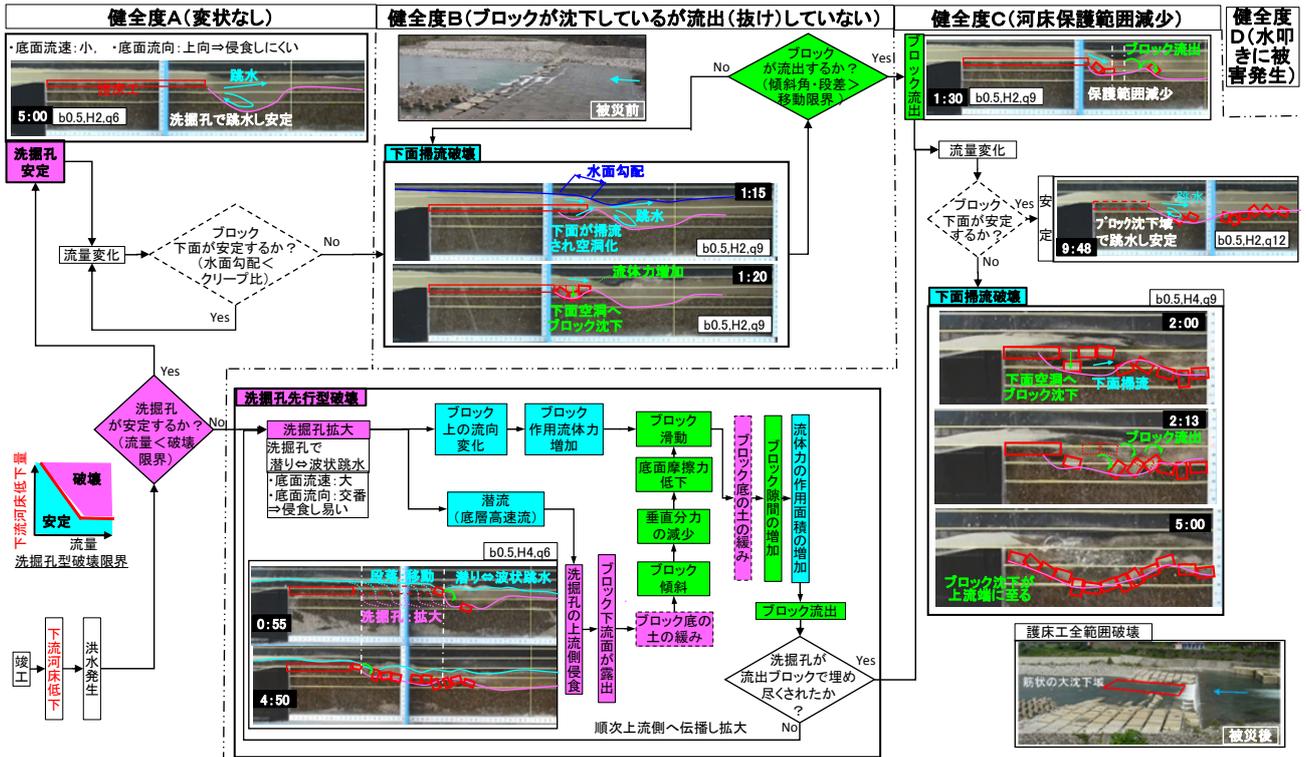


図-5 A川床止め フォルトツリー (仮説案)

4. フォルトツリー (仮説案) 構築

(1) 構築方法

抽出した素事象を発生順序にそって並べ、破壊機構を分類し、健全度を区分した。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。

(2) 破壊機構の分類

用語は重要で本来なら本報告で扱えるものではないが、フォルトツリーを構築するにあたり仮設定する必要がある下表のようにした。掃流は下流側への土砂移動、吸出しは負圧による上流側への土砂移動と仮設定した。

表-2 破壊機構の分類 (案)

場所	変状対象	機構	
護床工	下流河床	土砂	洗掘
	隙間	土砂	掃流 隙間掃流
	下面	土砂	下面掃流
	ブロック	力学移動	吸出し 滑動, 転動, めくれ
水叩	下面	土砂	ルーフィング
	本体	Co部材	磨耗, 折れ

(3) 健全度の区分

健全度は、横断構造物の機能が保たれているかどうか、損傷が進行しているかどうかの視点で分ける。堰の機能は湛水、床止工の機能は縦断方向の落差を保持する土留めである。堰本体工または床止本体が損傷する段階は、横断構造物の機能が低下するため、健全度Dと考える。

(4) A川床止めフォルトツリー (仮説案)

A川床止めの被災時の事実と仮説に基づき(表-3参照)フォルトツリーを構築した(図-5参照)。このうち、図-5の下中央部に枠囲いで示す洗掘孔先行型破壊は、下流端のブロックの下流側に洗掘孔が発生し、その孔に下流端ブロックが落ち込むことがきっかけで次々と破壊が上流側へ伝播していく破壊である。この破壊形態の機構は別稿論文を参照されたい¹²⁾。洗掘孔先行型破壊の実験では、ブロックが洗掘孔へ転げ落ちる直前に、ブロック下面が一時的に緩むことを観察した。流速は寄与せず、ブロック上下流水位差により土粒子の間のインターロッキングが外れルーフィングが発生した可能性がある。

表-3 A川床止め被災：事実と仮説

No	事実	仮説
イ	被災の前に下流河床高が約3m低下	下流河床低下が被災のきっかけと考える。
ロ	50tの大重量のブロックが流失	ブロックの力学安定性が高いため、ブロック底面が不安定となった。
ハ	護床工ブロックの下流側は流失し、水叩き側は沈下。	護床ブロックの下流側と上流側で機構が異なる。

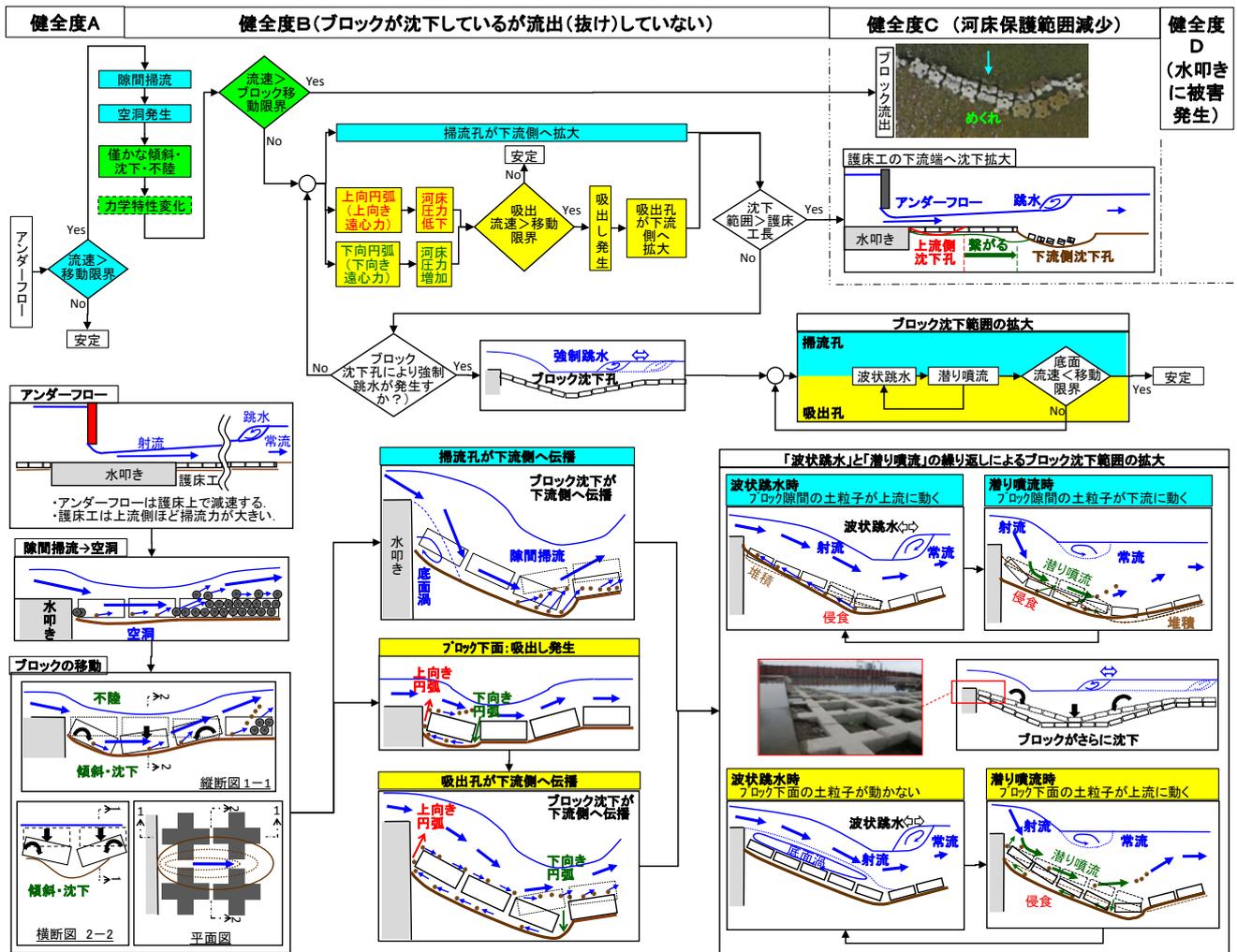


図-6 B川堰被災 フォルトツリー (仮説案)

(5) B川堰 フォルトツリー (仮説案)

B川堰の被災の事実と仮説を表-4に示す。平らなブロックはめくれ、十字ブロックは沈下しただけであった。

なぜ、十字ブロックはめくれたり転動したりせず沈下のみ発生したのかが疑問であった。この疑問への理由としては、弱いものから先に移動したと考えた。すなわち、十字ブロックの場合はブロックよりも土砂のほうが移動し易く、平らで空隙のすくないブロックは被覆されている土砂よりブロックの方が移動し易かったためと考える。

B川堰のフォルトツリーは、上記の水理模型実験の小さい重量でのブロックを対象とした連結あり屈とう性ブロック実験結果をもとに検討した(図-6参照)。

表-4 B川堰被災：事実と仮説

No	事実	仮説
イ	十字ブロック沈下被災 ・空隙が大きく凹凸があるブロック形状 ・滑動、めくれ、転動は生じていない。 ・上流側の広い範囲で発生	ブロックの形状と空隙が被災機構を左右していると考えられる。
	ブロックめくれ被災 ・空隙が小さく平らなブロック形状 ・上流端で発生した	

隙間での砂が流失するとブロック隙間の河床は下がり、河川横断方向からブロックの下面に空洞が生じる。空洞が生じるとブロックは沈降する。沈降は一律ではないため、平面的にブロックの表面は不陸となる。

負圧による吸出し機構における、水面形と流速と河床の土粒子の移動の関係について、ここでは遠心力による負圧現象で単純化して考察した。十字ブロックの水流方向部材の下面では負圧吸出しが生じ、十字ブロック同士の河川横断方向の隙間には掃流が生じる。底面の土粒子の動きは、負圧吸出しは上流向き、掃流は下流向きと向きが逆であるため、両者が共存したのか、どちらかが卓越したのかは判らない。

(6) C川堰 フォルトツリー (仮説案)

C川堰の被災前、被災中、被災後の条件と現地撮影写真と現地計測結果から確認した断片的な事実を順序付けるため、途中で発生した素事象、破壊機構、発生順序についての仮説を立て(表-5参照)、フォルトツリーを構築した(図-7参照)。

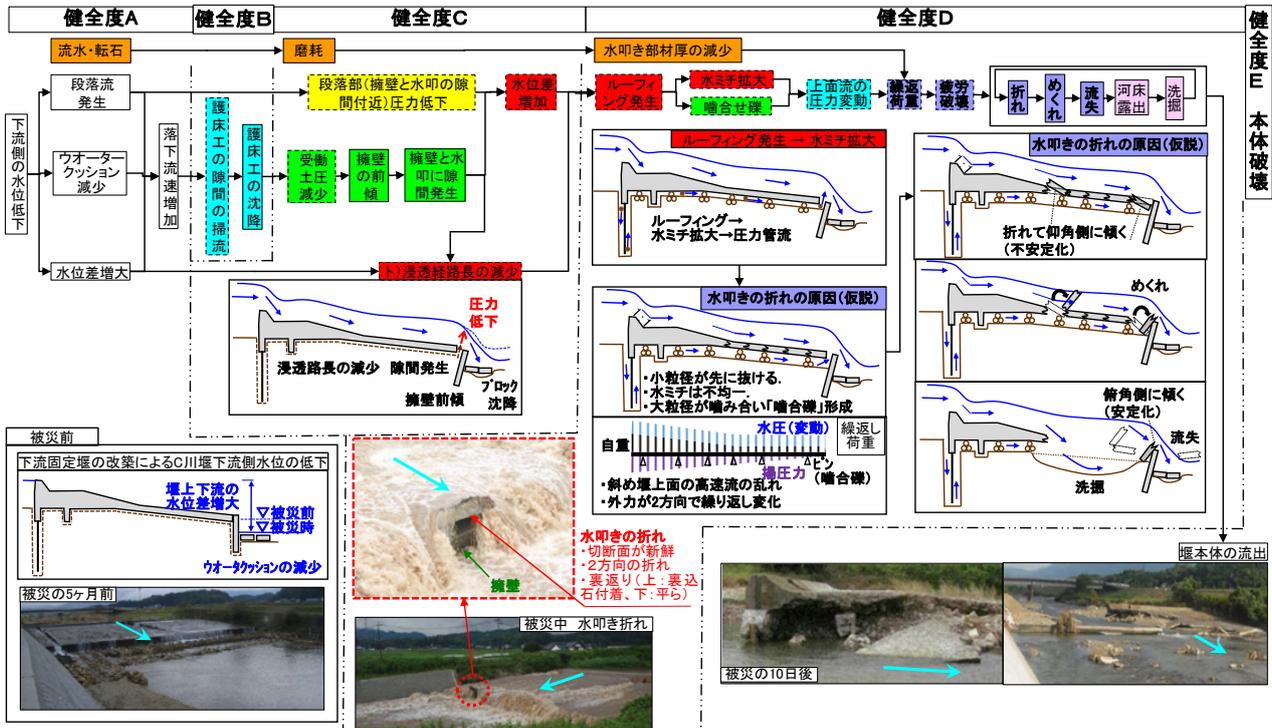


図-7 C川堰被災 フォルトツリー (仮説案)

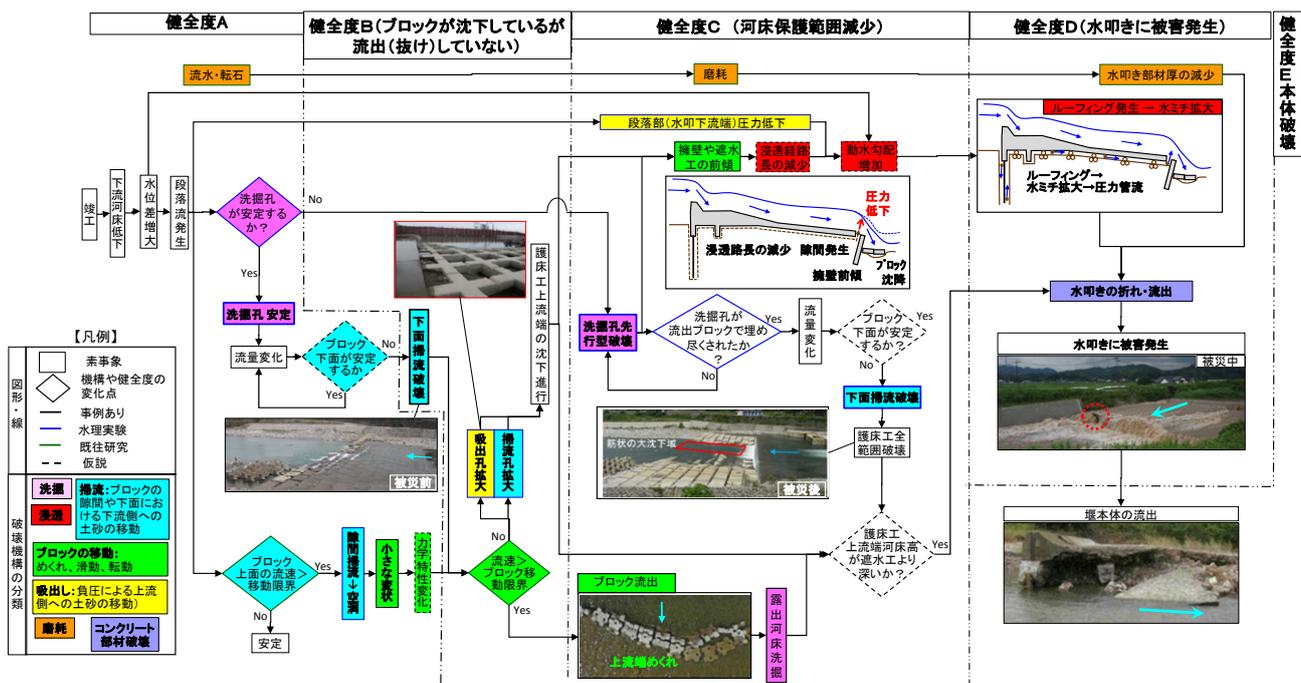


図-8 全事象網羅 フォルトツリー (仮説案)

表-5 C川堰被災：事実と仮説

No	事実	仮説
イ	下流水位低下	水位差が増大. ウォーターアクション効果減少
ロ	洪水で被災	水圧だけでなく流れも作用
ハ	洗掘孔なし	主原因は洗掘ではない.
ニ	護床工沈下	落下流速が増加し掃流が発生した.
ホ	擁壁が前傾	擁壁前面受働土圧が減少し擁壁が前傾
ヘ	擁壁と水叩に隙間が発生	浸透経路長減少
ト	Co片の特徴	2方向の破壊形状より疲労を考える.
チ	・2方向破壊	クラックが本洪水で発生し破断した.
リ	・破損面新鮮	水叩きに交番荷重が繰り返し作用した
ヌ	・裏返り	Co片は裏裏がめくれた.

(6) 全事象網羅 フォルトツリー (仮説案)

各フォルトツリーを要約して全事象を一つのフォルトツリーにした (図-8参照) .

全事象網羅版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.

今後、この仮説を検証する必要がある.

5. 結論

山本ら⁸⁾は横断構造物の水理実験から今後の研究課題について整理している。本報告では被災機構毎に発生する素事象を抽出し、発生順序と健全度と変化点を検討し、フォルトツリーの構築を試みるなかで見出した課題を整理する。今後、これらの課題を解決するために水理模型実験により検討するとともに、これらの現象を表現できる数値モデルを開発する必要がある。

- 1) 洗掘孔の形状は、洗掘孔の深さについては、Hoffmansら¹¹⁾、などの多くの既往研究がある。洗掘孔の最深部の発生位置や洗掘長といった水平方向の形状については内田ら⁵⁾、神田ら⁶⁾の研究がある。単位幅流量と下流側河床低下量、河床勾配、ブロックの隙間、粒径等多くの変数毎の、洗掘孔形状と下流端ブロックの下面空洞長についての知見は不足しており、今後、検討し網羅的に集約する必要がある。
- 2) 掃流型破壊深さと範囲と勾配について把握することは、護床工を補修する範囲とブロックを検討するために必要である。護床ブロックの大きさ・形状・隙間・凹凸・連結有無毎に検討する必要がある。
- 3) 吸出し型破壊機構においては、水理模型実験でブロック下面と河床の間での連続的な吸出し経路は空洞が小さいと発生し空洞が大きいと絶たれることを確認した。吸出し経路においては摩擦損失が生じるため、空洞の大小が経路へのエネルギー供給に関与している可能性がある。
- 4) 流れに対するブロックの傾きと水理特性値の関係は、既往技術基準³⁾では、流水直角方向の水平面からの傾きの影響を考慮する方法が示されている。流水方向のブロックの傾きの既往研究^{3),9)}では、ブロックが俯角側に傾くと安定性が高くなる知見が得られているが、ブロックが仰角側に傾いた場合の水理特性値についての研究はない。B川堰と、C川堰の被災事例は、平らで空隙が少ないブロックに僅かな仰角が発生すると力学的に急に不安定になる脆弱さを示唆していると考えられる。ブロックの傾きは現場で目視可能であり管理指標になりうると考える。
- 5) 水叩き下面の浸透破壊であるルーフィングは既往設計基準¹⁾ではレインの式により評価する。ルーフィングはスラブ下面だけではなくブロック下面でも起こることが既往研究¹⁰⁾で示されている。今後、ルーフィングを数値モデルで表現するため、レインの式をインターロッキングによる内部摩擦角と圧力差の観点から再整理する必要がある。
- 6) 連結なしブロック実験では、下流側から洗掘孔先行型で始まった破壊が、洪水流量が増えると掃流卓越型や吸出し型で上流側へ進展した。このように、卓越す

る破壊機構は時間的空間的に変化する。

- 7) 二つの三次元性がある。巨視的には河道のミオ筋や二次流の影響、微視的にはブロックの隙間掃流と、ブロック正面直下流側での洗掘の卓越性である。
- 8) 横断構造物における複雑な水理現象は数値モデルで予測や対策を検討する。既往技術基準では、落差高と単位幅流量の関係が、跳水、潜り、露出射流、噴流等の水理状態が示されている⁴⁾。一方、実務ではフォルトツリーで破壊機構毎に細分化した素事象や分岐に対して、および、落差高と単位幅流量の関係といった簡易的な指標を組合せることが、補修判定の検討に有効であると考えられる。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省の河川砂防技術研究開発公募（研究代表者：清水義彦）により行われた。ここに謝辞を述べます。

参考文献

- 1) (財) 国土開発技術研究センター編：床止めの構造設計手引き、山海堂、1998。
- 2) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法、森北出版、2005。
- 3) 実務者のための護岸・根固めブロック選定の手引き（案）、(財) 土木研究センター、2010。
- 4) 土地改良事業計画設計基準・設計「頭首工」、農林水産省構造改善局、2008。
- 5) 内田龍彦、福岡捷二、木下真理子：落差工下流の河床洗掘孔を考慮し設置された粗朶沈床の効果検討、河川技術論文集 Vol.11, pp.399-404, 2005。
- 6) 神田佳一、村本嘉雄、藤田裕一郎：護床工下流部における局所洗掘とその軽減法に関する研究、土木学会論文集 No.551, pp.21-36, 1996。
- 7) 河川構造物の被災形態とその事例集、河川構造物災害調査研究会、1987。
- 8) 山本陽子、中村良二、諏訪義雄：被覆ブロック形式床止め工の変状水理実験から整理された研究課題、河川技術論文集 Vol.24, pp.143-148, 2018。
- 9) 井上浩一、田中規夫、八木澤順治：護床ブロックの洪水に対する安定条件に関する研究、水工学論文集, Vol.53, pp.961-966, 2009。
- 10) 清水義彦、中川博次、辻本哲郎、村上正吾：堰の一被災機構としての護床工からの砂のぬけ出しによる空洞化の進行過程、水理講演会論文集Vol.31, pp.359-364, 1987。
- 11) Hoffmans, G.J.C.M. : Jet scour in equilibrium phase, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.124, No.4, pp.430-438, 1998。
- 12) 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、河川技術論文集 Vol.25 投稿中

(2019. 4. 2受付)