

流砂の連続性確保(2) ～河道内横断構造物管理の課題例と解決の方向～

猪股広典・小関博司

1. はじめに

沖積河川の河道は、供給される流砂が分級堆積し形成・維持されている。検討対象とする河道地形を有意に構成する粒径集団を「有効粒径集団」と呼ぶ。堰や落差工等の河川横断構造物は、上下流河床の有効粒径集団流砂フラックスに影響を与える場合があり、その程度は河道特性、構造物の種類、上下流河道との相対的な関係により異なる。

インフラの長寿命化や気候変動への適応のためには、自然公物である河道と横断構造物の変化やその積み重ねである現況を把握・理解し、その知見を反映した点検・維持・対策によって、横断構造物の機能持続と河道変化を望ましい方向に誘導するマネジメントが求められる。

流砂の連続性確保(1)は、貯留型ダムからの土砂還元・通砂の事例と考察を述べた。本報文は土砂の還元先となる下流河道（特に河床）の有効粒径集団流砂フラックスの変化と河床・横断構造物との相互作用（応答）、その結果生じたと考えられる構造物や河床の変状事例等を紹介する。事例の考察等を通じて、有効粒径集団流砂フラックスを考えた河川横断構造物と河道の管理の今後の方向性について述べる。

ダム技術の今後の展開の特集であるが、紹介事例はダム・貯水池からの通砂・土砂還元が関係ないものも含む。河床有効粒径集団の土砂動態（流砂フラックス図）を通じた河道・構造物管理の検討が、ダムからの通砂・土砂還元・バイパスの効果を高めることにつながると考えるからである。

2. 土砂動態と河床・構造物の応答

河川は洪水が来襲するたびに流れと流砂によって河床変動や滞筋の移動が起きるなど常に変化する自然公物である。平常時には河道内で植生が繁茂し、流れの抵抗、流砂の補足、河岸や高水敷等の侵食・洗掘を一定程度防ぐ、限界を超えると流

失するなど洪水流・流砂との相互作用を有する。

河道内に存在する横断構造物（落差工・堰・橋）は設置時期が様々であり、設置当時の河道や改修計画を前提に設計されている。横断構造物は、洪水に対する応答として、洪水流・流砂・周辺河道と相互作用を及ぼしあい、河道との相対的な関係を変化させながら存在している。

例えば、砂利採取等により河道縦断形が全体的に低下した場合、それ以前の河道を前提に設置された河川横断構造物は、河道縦断形の中で相対的に上に突出する。このため洪水時掃流力が横断構造物上流で減少し河道の有効粒径集団流砂フラックスが減少する。その結果、横断構造物上流河道では堆積が、下流河道では河床低下が生じる。この応答は河床有効粒径集団が掃流形態の流砂で流れる砂利河道で生じやすい。

3.の事例紹介と考察では、河床の有効粒径集団流砂フラックスの変化によると考えられる河道応答の事例として、3.1横断構造物上流の堆積と下流の河床低下、3.2礫河道の滞筋のみが河床低下する河道二極化、3.3砂河道の（砂利採取に伴う）砂枯渇と沖積粘土薄層の露出・破壊による二極化（最深河床高の低下）、3.4固定放流ゲート下流における洗掘をとりあげる。

3. 土砂動態変化と河道及び構造物応答事例

3.1 横断構造物上流の堆積と下流の河床低下

堰等の横断構造物設置後に上下流河道が砂利掘削等により河床低下すると、横断構造物が河床から突出する形になり、中小洪水時に堰上げ背水が効くようになり掃流力が低下する。その結果図-1の礫流砂フラックス図に示すように、河床低下前は上下流ほぼ一定であった礫流砂フラックスが堰の湛水地で減少、堰下流で増加することで、堰湛水地で堆積が、堰下流で河床低下が生じる。

黒部川の愛本床止工（落差工、13.2km）のH23被災はこの例と考えられる。河床有効粒径集団である礫は、上流の宇奈月ダムと出し平ダムの連携排砂により供給が促進されているものの、宇

奈月ダム（20.5km）と愛本床止工の間に位置する愛本堰堤（13.55km）が礫流砂フラックスを減少させる役割を果たしている（図-1下）と考えられる。加えて15km付近の河道幅が広い場所でも礫が堆積し、愛本床止工の下流に連携排砂の効果が十分及んでいないと指摘されている¹⁾。

この応答に対し、堰堤及び床止めにおける礫流砂フラックス減少を緩和し床止め及び下流河道の安定化を図ることが考えられる。愛本堰堤上流に石畳排砂水路とクリーク水路を掘削することで縦断形を改良し、愛本堰堤から下流への礫流下を促進する対策が検討されている¹⁾。

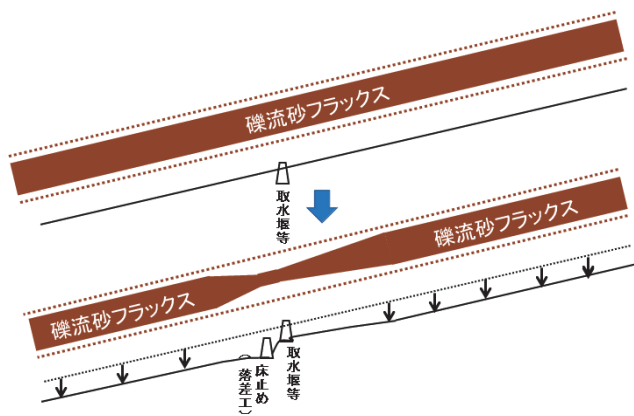


図-1 横断構造物河床低下流砂応答（概念）

3.2 礫河道の二極化と橋脚不安定化

礫河川では、砂州の高標高部が中小出水で移動せず固定化・河川によっては樹林が繁茂し、滞筋部分だけが河床低下する二極化と呼ばれる河道変化が生じ、河道管理上の課題となっている場合がある。二極化が生じる理由・メカニズム、特に流砂供給量との関係は完全に解明されていない。

二極化した河川は河床材料有効粒径集団である礫の流砂が滞筋部に限定されることから礫流砂フラックスが、二極化以前に比較して減少している可能性が高い。

令和元年（2019年）10月の台風19号時に橋脚（P6・P7）と桁が沈下・傾斜（図-2）した法雲寺橋（1959年竣工）の被災は二極化進行の影響と推察される。2019年8月撮影のGoogle Street View橋上写真とGoogle Earth時系列空中写真から、2010年以降P6橋脚付近に滞筋が固定されていたことが確認できる。

図-3は、竣工当時（上段）と被災時（下段）の礫流砂フラックス、平均河床高及び最深河床高縦

断図、河床横断図の変化を概念図にしたものである。滞筋固定化が進む二極化発生前後で動的平衡状態にあったと考えられる竣工当時の礫流砂フラックス（上段フラックス図の太さ）よりも礫の流砂供給量が減少したと考えられる。なお、礫供給量減少の要因は今後調査する必要がある。

中小洪水時に礫流砂の供給が不足（下段のフラックス図の太さ縮小）した状態で滞筋部を洪水が流れるため、最深河床高（滞筋部）のみ河床低下が進行し、礫流砂フラックスが砂州の滞筋縦断形に応じた縦断方向の増減を生じ洗堀が増大する（下段図）。R1台風19号時に洗堀がフーチング底面よりも大きくなり橋脚・桁の沈下・傾斜に至ったと考えられる。



図-2 法雲寺橋被災状況²⁾

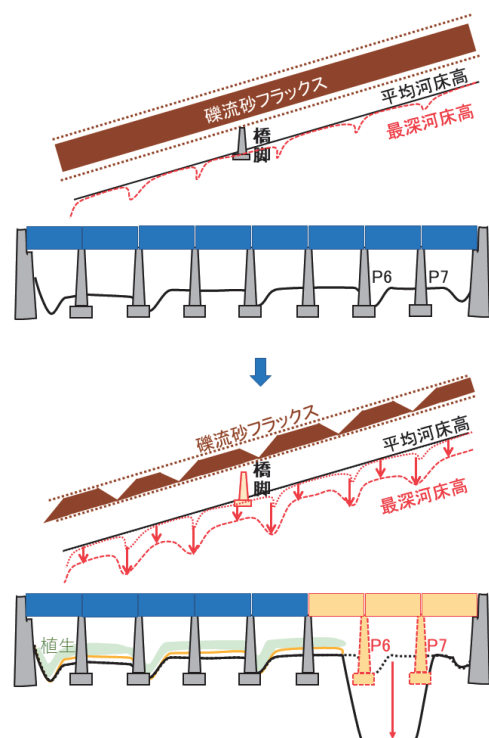


図-3 二極化進行による橋脚沈下（概念）

濡筋部の河床高（最深河床高）の動向に留意し、フーチング露出の恐れがある場合には護床工で洗掘対策を施す・根継ぎする等の予防保全策を講じることができる点検・診断・対策の手順書を取りまとめることが有効な対策と考える。

二極化のメカニズム解明も重要である。二極化が生じた河川で供給土砂が減少した要因、二極化の時間的な進行等について調査した後、水理実験等による検証、二極化が生じていない河川との比較考察等が有効と考えられる。

被災を受け法雲寺橋は架け替えることになった（結果的に事後保全）。同橋は、河川管理施設等構造令施行（1976年）前の橋であり、施工当時の技術水準から桁（径間）長が短い。架け替えによって構造令に適合する橋梁となる。気候変動による洪水の激甚化が懸念される中、予防保全・長寿命化に加え、通行機能を迅速に回復する事後保全策の充実も重要な検討課題である。

3.3 砂河道の砂枯渇と沖積粘土薄層の露出・破壊による二極化（最深河床高の低下）進行

河床有効粒径集団が砂の河川で沖積粘土上の河床材料の層厚が比較的薄い場合（図-4上段）に、沖積粘土層が露出する（砂層が枯渇する）まで砂採取すると（図-4下段）、砂流砂フラックス小さくなり、沖積粘土層が侵食・洗掘されるようになる。

沖積粘土層を突破するまで侵食・洗掘が進行すると、その下に位置する沖積砂層も流出することで顕著な洗掘が生じることがある。洗掘の発生場所が横断構造物に近い場合、横断構造物の健全性に影響を及ぼす（図-4下段）。

鬼怒川中下流部では、砂採取による掘削と上流部に設置されたダムや砂防事業による土砂流出抑制による供給土砂量の減少等により河床が低下した結果、23kmの石下橋で橋脚基礎が浮き上がった。対策として、下流22.75kmに石下床止（落差工）を設置し上流河道の縦断形制御を行った³⁾。

全川的に河床低下が進行している木曽川においても、特に37kmにおいて濡筋に露出し洗掘の進行を抑制していた沖積粘土層が複数回の出水により流出し、沖積粘土層より下層に位置していた砂層をさらに流出させることにより、鉛直方向に15m以上の顕著な洗掘が進行している⁴⁾。

砂枯渇・洗掘進行に対する対策の方向は、砂流砂供給量の増加（例えば土砂還元）、沖積粘土層

分布を把握した上で縦横断形制御構造物（床止め・根固め工・護床工等）の配置が考えられる。土砂還元・通砂技術の開発・実装、粘性土層の分布把握手法開発、河床砂が枯渇した沖積粘土層の制御手法開発が必要である。

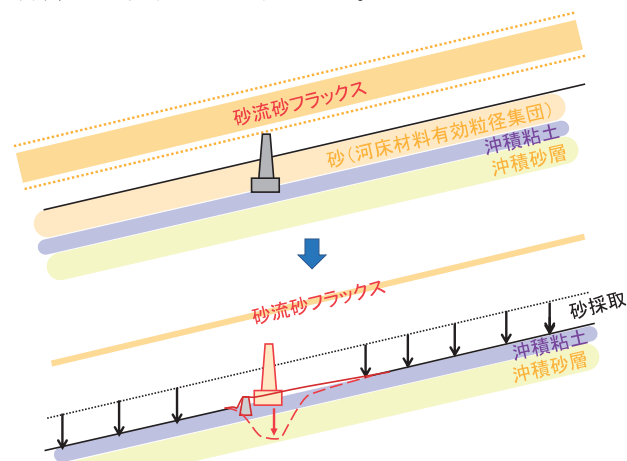


図-4 砂枯渇沖積粘土層破壊洗掘進行（概念）

3.4 固定放流ゲート下流における二極化（洗掘箇所固定と最深河床低下）

船明ダムは、天竜川下流部に位置する1977年に建設されたコンクリート重力式ダムであり、浜松平野扇状地扇頂上流に位置し、発電に加えて天竜川からの各種用水取水の要となる重要構造物である。ダム高さ24.50m、堤頂長220.0m、右岸側に設置されている1号から左岸側の9号まで計9門のローラーゲートを有する。管理移行後、9門のゲート操作方法について、ピラミッド型放流→部分均等放流→全門均等放流と改善を重ねてきた⁵⁾。

船明ダムは、ゲート全開しない中小洪水では、河床有効粒径集団である礫流砂フラックスを貯水池で大きく減少させる。一方部分均等放流ゲート下流は河道の全流量を集め掃流力が大きく礫流砂フラックスがダム直下流で急増する。この結果ダム上流で堆積・下流で洗掘する（図-5上段）。

なお、4号ゲート下流の洗掘が極端に大きいのは1～3号ゲート直下の平面的な旋回流れ（旋回流）が4号ゲート付近の放流水と合流することで下降流となり洗掘を助長するためである⁵⁾。

図-5下段は、全面均等放流に変更した中小洪水時の礫流砂フラックス図、河床縦横断形変化である。全面均等放流にすることでゲート下流の単位幅流量が減り、ゲート直下流の掃流力急増による縦断方向の礫フラックス急増が緩和する。その結

果、洗掘量も大幅に減少する。2014年6月に全門均等型操作を導入して以降は、図-5下に示す通り洗掘が大きく緩和された⁹⁾。洗掘の偏り緩和の要因は、全面均等放流への変更に加えて水制による旋回流抑制の効果も含まれる。

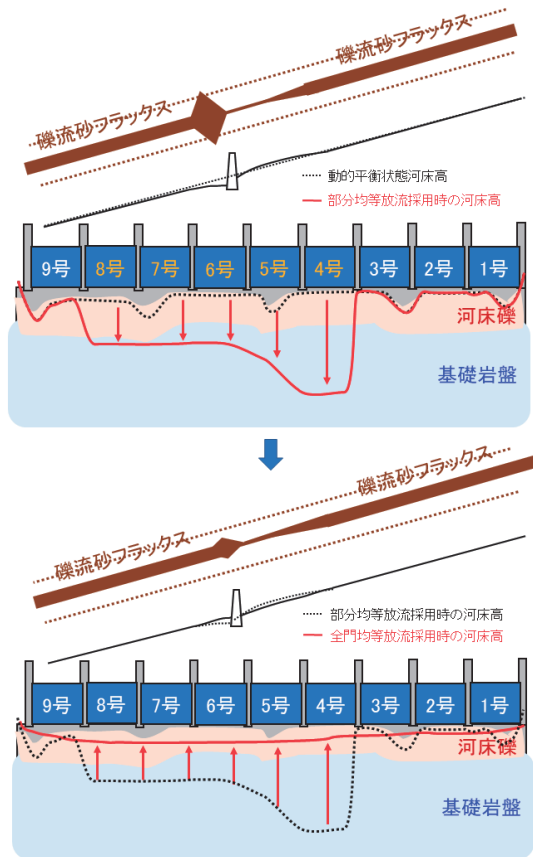


図-5 ゲート下流の二極化進行（概念）

※上段図4～8号ゲート（数字着色）で部分均等放流実施

3.5 対策・研究の方向性

横断構造物上下流の河床縦断形変化は、河床材料有効粒径集団の洪水規模別及びトータルの流砂フラックス図作成が基本である。礫河川と砂河川では洪水規模別の流砂運動形態が異なるので、それらを意識した検討が重要である。

橋脚予防保全は、適切な点検実施が重要である。近接目視点検に加え、目視点検が困難な水深が深い場所は、グリーンレーザやマルチビーム等3次元測量が有効である。グリーンレーザは、近年ドローンに搭載可能なスキャナが利用可能であり、一定の透明度を有した河川であれば、近接することが困難な横断構造物における活用が期待される。

3次元測量を活用した横断構造物及び周辺河道の状況把握・診断、適切な予防保全を行うためには河道や構造物の洪水応答の理解が重要である。

現場が使いやすい予防保全策を整理するためには、各対策の実施容易性・費用・効果の評価を、研究者目線はもとより現場実務者の目線を加えて検討することも肝要である。

4. おわりに

河床有効粒径集団流砂フラックス変化と河道・横断構造物の相互作用（応答）、その結果生じたと考えられる構造物や河道の変状事例等を紹介し、有効粒径集団流砂フラックスを考えた河川横断構造物と河道の管理の今後の方向性について述べた。

土木研究所水工研究グループにおいては、本報文において述べた研究について順次着手予定である。特に横断構造物の点検及び予防保全に向けた研究については、橋脚の洗掘について同所の構造物メンテナンス研究センター（CAESAR）と共同で取り組むこととしている。

参考文献

- 1) 後藤岳久、桶川勝功、福岡捷二、福田朝生：黒部川愛本堰堤から排砂を促進するための技術開発と交互砂州河道の回復、土木学会論文集B1（水工学）、Vol.74、No.5、I_865～I_870、2018
- 2) 国土技術政策総合研究所、土木研究所、建築研究所：令和元年（2019年）房総半島台風および東日本台風による土木施設・建築物等災害調査報告、国総研資料第1111号、土研資料第4400号、建研資料第199号、2020
- 3) （財）河川環境管理財団河川環境総合研究所、鬼怒川の河道特性と河道管理の課題－沖積層の底が見える河川－、2009
- 4) 齋藤正徳、古賀博久、高橋伸次、稲葉傑、浅野和広、黒田直樹、柳瀬伸一、西澤諒亮：木曽川における大規模深掘れの発生要因の分析、河川技術論文集第20巻、pp.259～264、2014
- 5) Kitamura Y., Takagi S.: Hydraulic study on scouring downstream of Funagira Dam spillway apron (Japan), Proceedings of the 8th International Conference on Scour and Erosion, pp.643-652, 2016

猪股広典



土木研究所つくば中央研究所水工研究グループ
上席研究員（特命事項担当）、博士（工学）
Dr. INOMATA Hironori

小関博司



土木研究所つくば中央研究所水工研究グループ水理チーム 研究員
KOSEKI Hiroshi