

赤谷川流域における砂防堰堤設計について ～真砂土流域における堰堤型式の選定，施設効果～

北本 楽¹・梅本 武史¹・川合 康之¹

¹筑後川河川事務所 九州北部豪雨復興出張所（〒838-1511 福岡県朝倉市杷木池田483-1）

H29.7九州北部豪雨を契機として平成29年度より筑後川水系赤谷川流域で直轄砂防事業に着手しているところである。赤谷川右岸流域は、風化しやすい一面を持つ朝倉花崗閃緑岩が分布し、風化作用により砂状となった「真砂土」が多く堆積している。真砂土はその粒径が小さいことからその流出現象が特殊であり砂防堰堤の設計にあたって留意が必要である。本報告では、赤谷川流域における土砂流出特性に応じた砂防堰堤設計に関する考え方について報告する。

Key Words: 九州北部豪雨，砂防事業，砂防施設設計，施設効果

1. はじめに

「平成29年7月九州北部豪雨」では、同時多発的な斜面崩壊等（写真-1）が発生し、大量の土砂や流木が流下した赤谷川や白木谷川流域など、筑後川右岸流域で多数の人的被害や家屋被害が生じた。

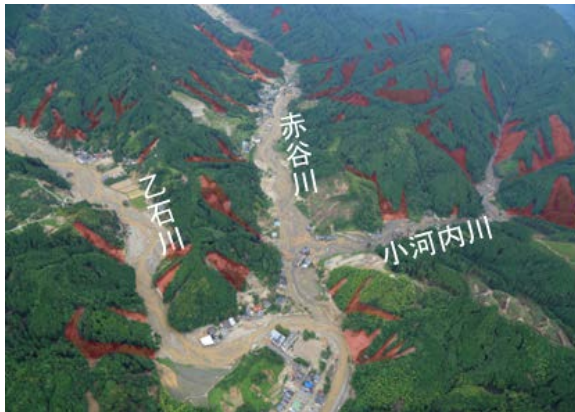


写真-1 赤谷川流域で発生した山腹崩壊（H29. 7）

赤谷川流域に属する4河川のうち、特に赤谷川、乙石川および小河内川の3河川においては災害後も溪流内の斜面や溪床に不安定土砂や流木が堆積した状態であり、土砂移動による二次災害を防止する必要があった。このため、福岡県知事の要請により赤谷川流域では直轄特定緊急砂防事業を実施しているところである。

当該砂防事業では、被災直後より行った緊急点検結果及び継続して行った危険度評価に基づき、土砂・流木が大量に残存し、家屋等被害の拡大の恐れや河道への流出の影響が大きい30溪流を対象に事業を行うこととしている。この各溪流において様々な形態での土砂流出現象が確認されたことから、土砂流出の特性に応じた砂防施設を配置する必要が生じた。本報告では、赤谷川流域における土砂流出特性に応じた砂防堰堤設計の考え方について報告する。

2. 流域の地質概要

赤谷川流域は左右岸で地質が異なり、溪流によって流出土砂の粒径に特徴が見られた。右岸流域は、風化しやすい一面を持つ朝倉花崗閃緑岩が分布し、風化作用により砂状となった粒径の小さい「真砂土」が多く堆積している。一方、左岸側は大半が薄く剥がれやすい片状構造が発達している比較的粒径の大きい三郡変成岩が分布している（図-1）。

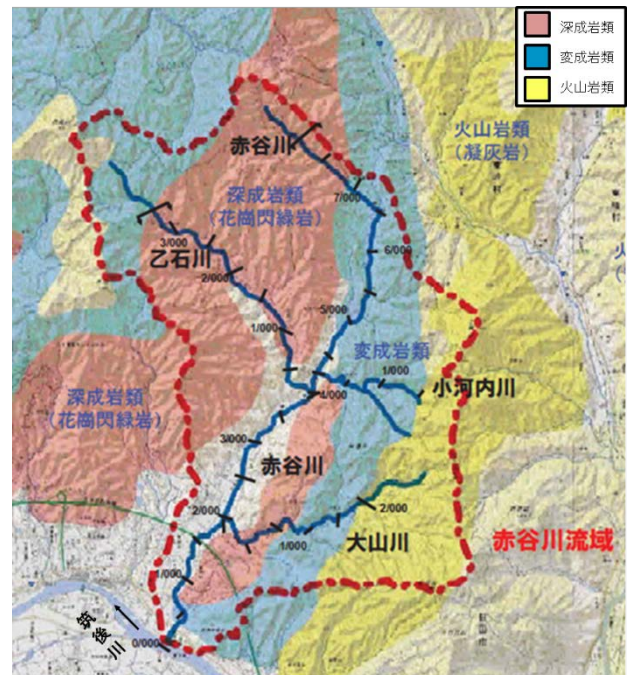


図-1 赤谷川流域の表層地質図

花崗閃緑岩を主体とする溪流の洪水痕跡からは、概ね粒径が細かい真砂土を主体とする土砂流出と溪流出口においても巨礫の到達が見られないことが確認された。こうした流域では土砂は石礫を主体とする土石流ではなく泥流や掃流砂状態で流出した可能性が考えられる。

対して変成岩類を主体とする溪流の洪水痕跡では、比較的粒径の大きい土石流痕が見られた(写真-2)。



写真-2 谷出口の土砂堆積状況
(右：真砂土主体、左：変成岩主体)

2. 砂防堰堤形式の選定

砂防堰堤の型式は、その目的・機能、堰堤サイトの地質、施工性、経済性を考慮して決定する必要がある。目的・機能によって透過型、不透過型等の選定、地形や地質状況により重力式やアーチ式等の選定、土石流出形態による選定等様々な要素がある。

以下に一般的な砂防堰堤型式について示す(図-2)。

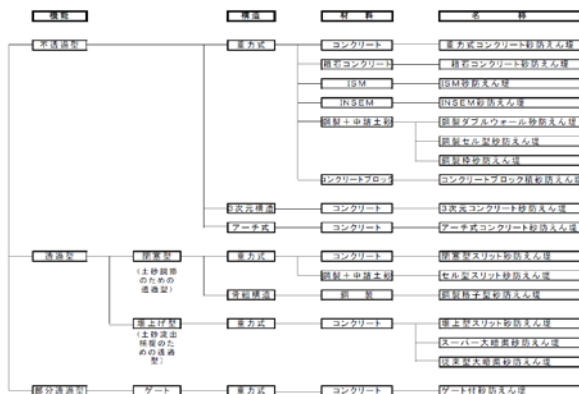


図-2 砂防堰堤の分類

また、赤谷川流域で整備する溪流は、そのほとんどの溪床勾配が1/30よりも急な土石流区間(図-3)である。

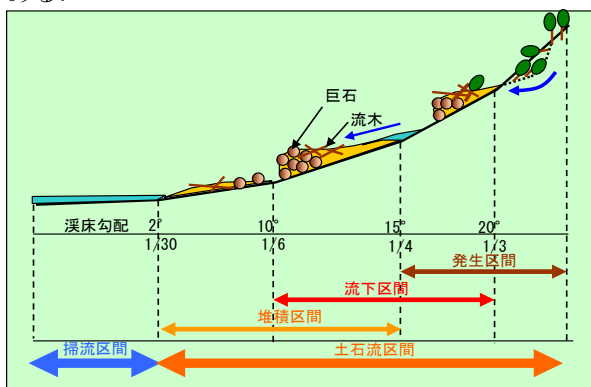


図-3 溪床勾配と土石流の運搬形態の関係

このことから施設設計については、「土石流・流木対策設計技術指針(以下、土対針という)」に基づき設計する。土対針によれば、平成25年の伊豆大島土石流災害をはじめとし、近年の土石流災害では土石流とともに流下する流木が砂防堰堤を乗り越え、下流の氾濫被害を増大させるとして、土砂とともに

流出する流木を捕捉するため、透過構造を有する施設を基本とすることが示されている。

しかしながら赤谷川流域では、前述のとおり溪流によっては支配する土砂粒径が細かいことから、透過型砂防堰堤の透過部を閉塞させるのに十分な大きさの粒径を含む土石流が発生しない可能性がある。その場合、土石流を透過部で捕捉できず下流域へ流出してしまう可能性がある。

以上より、各溪流の土砂流出特性について以下の項目について着目し堰堤形式を選定することとした。

- ① 溪流の礫径調査結果
- ② 溪床勾配
- ③ 上流域の土砂扞止の必要性

この結果を、選定フロー(案)としてまとめたものを(図-4)に示す。赤谷川流域での堰堤形式は流域特性に応じて6つに分類し設計を行っている。

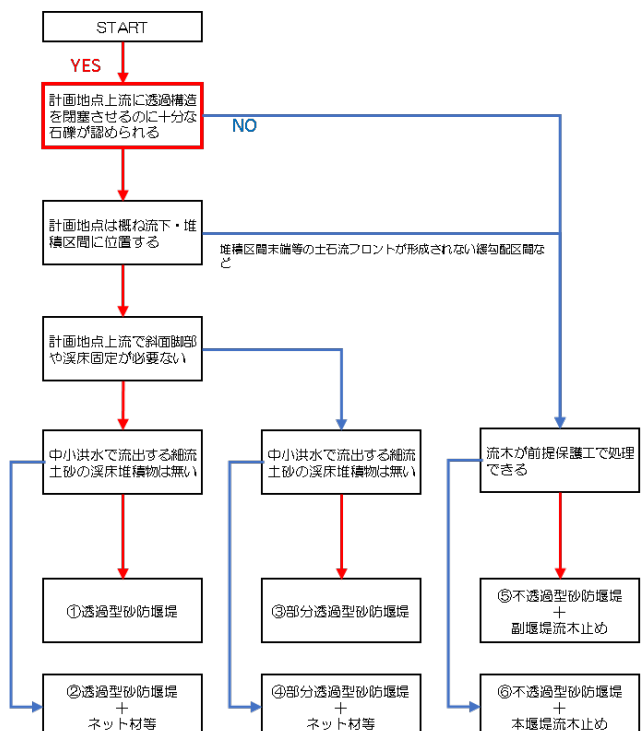


図-4 赤谷川流域 砂防堰堤形式選定フロー(案)

3. 計画捕捉量(堆砂勾配)の考え方

砂防堰堤において通常出水により流出する土砂は平常時堆砂勾配で堆積し、土石流などの洪水時の土砂流出は平常時堆砂勾配より急な洪水時堆砂勾配で堆積すると考えられている。堰堤計画では洪水時堆砂勾配は計画堆砂勾配として扱われる。土対針によると透過型堰堤における計画捕捉量(図-5上: 赤ハッチ範囲)は堰堤天端からの計画堆砂勾配と現溪床との間の堆積量としている。また、不透過型砂防堰堤における計画捕捉量(図-5下: 赤ハッチ範囲)は堰堤天端からの計画堆砂勾配と平常時堆砂勾配との間の堆積量としている。

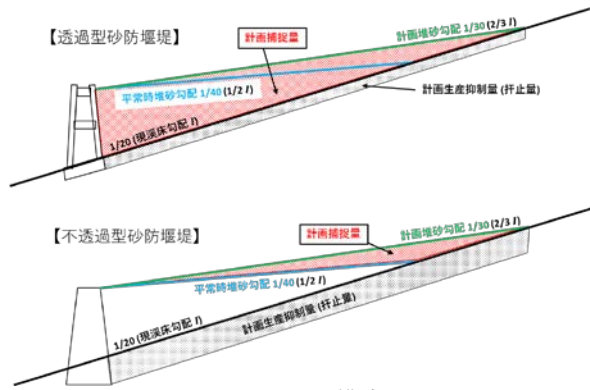


図-5 効果量の模式図
(上:透過型砂防堰堤, 下:不透過型堰堤)

平常時堆砂勾配は既往実績等により、施設を配置する地点の現溪床勾配の1/2倍とすると定められている。また、計画堆砂勾配は現溪床勾配の2/3倍とすると定められている。しかし、真砂土やシラス等の小粒径の溪床材料が占める割合が多い地質条件では粒径が大きい地質条件に比べて平常時堆砂勾配および計画堆砂勾配が緩くなることが知られている。

海堀は粒径が細かい真砂土が広く分布する広島県において砂防堰堤の堆砂勾配について調査し、満砂状態17基の砂防堰堤の平常時堆砂勾配は現溪床勾配の1/3倍程度と通常の砂防堰堤の堆砂勾配より緩く堆積していることを明らかにした(海堀, 1992)。これらの理由として、流域面積が小さいこと、堆砂物質の粒径が細かいこと、土砂移動頻度が少ないことを挙げている。また、水山らは全国の直轄砂防工事事務管内の288基の砂防堰堤の堆砂勾配測量資料を整理し、現溪床勾配に対する堆砂勾配は時間的に変動し、現溪床勾配が1/10以下の場合には、平常時堆砂勾配は現溪床勾配の1/2倍からばらつくことを明らかにした(水山ら, 1990)。

このように、流域面積の大きさ、溪床勾配、土砂流出の時間的な変化により平常時堆砂勾配および計画堆砂勾配は変化すると考えられ、特に支配する土砂粒径が細かい地質条件下で砂防堰堤を設計する際は、堆砂勾配の設定に留意する必要がある。

しかしながら、赤谷川流域では堆砂勾配等を計測した資料が無く、かつ緊急的に砂防施設を整備する必要があることから、砂防堰堤の設計段階では土対針に基づき平常時堆砂勾配は現溪床勾配の1/2倍、計画堆砂勾配は現溪床勾配の2/3倍として計画捕捉量を算定した。上記課題については赤谷川流域でも真砂土を主とした溪流の堆砂勾配が緩勾配になると懸念されるため、後述する検証試験等に基づき確認し、維持管理において結果を活用することとした。

4. LPデータを用いた堆砂勾配の確認

治山堰堤・砂防堰堤に堆積した土砂の種類及び堆砂勾配についてH29. 7九州北部豪雨発災直後に取得したレーザープロファイルデータを用いて整理した。計50基の堰堤の調査結果を示す(図-6)。真砂土を主とした33基の堰堤の堆砂勾配は現溪床勾配の2/3

倍が5基、1/2倍が13基、1/3倍が11基、1/4倍以下が4基であり、堆砂勾配は現溪床勾配の2/3倍から1/5倍と溪流によって変動幅があることがわかった。堆砂勾配が現溪床勾配の1/3倍以下の堰堤は全体の3割を占めており、土対針で示される堆砂勾配よりも緩勾配で土砂が堆積する可能性が高い溪流が存在した。

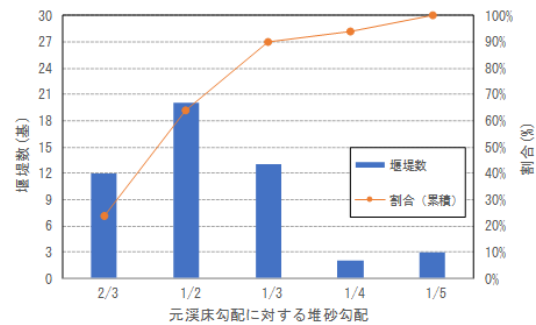


図-6 現溪床勾配に対する堆砂勾配と堰堤数の関係

このことから、赤谷川流域における砂防堰堤効果量把握には、各溪流の溪床勾配および土砂粒径によって異なる堆砂勾配を考慮する必要がある。

また、整理したデータは、洪水直後の土砂堆積状況を反映している推定され、時間的経過、空間的な堆砂状況が推定出来ないことから、溪床勾配や粒径による堆砂勾配の変化を把握するため堆砂勾配検証実験を行った。

5. 堆砂勾配検証試験

5.1 実験概要

(a) 実験目的

赤谷川流域内の大小さまざまな溪流における土砂流出を想定するために、溪床勾配、粒度分布、流量をそれぞれ変えた条件下で水理模型実験を行い、平常時および計画堆砂勾配を確認した。

(b) 実験水路

実験水路は水路幅10 cm, 水路長7 m, 水路勾配は最大20度程度まで可変である矩形直線水路を用いた(写真-3)。



写真-3 堆砂勾配検証実験水路

実験水路に取り付けられたポンプの吐出し量は21.7 L/sで全揚程は10 mである。水路形状や給水能力の関係から、想定する縮尺は1/40とした。水路勾配は砂防施設計画が実施される範囲を想定し、15度(土石流発生区間)、10度(土石流流下区間)、6度(土

石流堆積区間)の3段階を設定した。

(c) 実験砂

震災後の調査では真砂土主体で玉石がほとんど含まれない細粒土砂により構成された溪床や直径1.0 m級の巨石を含み表面が石礫でおおわれている溪床(乙石川最上流など)、及びその中間的な粒度分布を持つ溪床が確認された。このため、実験では溪床材料調査(平成30年7月)の粒度分布の範囲で上記の溪床材料を想定する3種類の粒度分布を想定し、小粒径から順にA砂、B砂、C砂とした。使用する実験砂の粒度分布を(図-7)に示す。

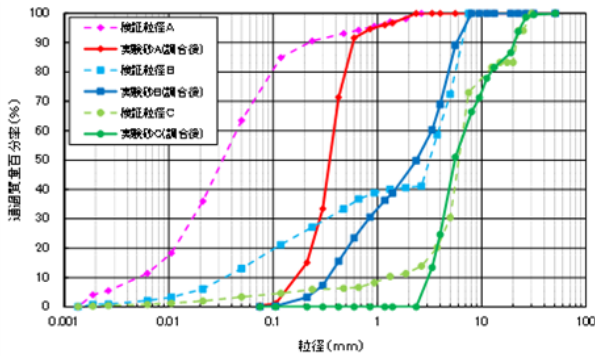


図-7 実験砂の粒度分布

ただし、既往調査では粒度分布に巨礫を含まないため、調査箇所を対象に追加で線格子法による粒径調査を実施し、既往調査結果に合成することにより粒径加積曲線を想定した。また、実験では細粒砂は浮遊状態となり溪床変動に寄与しないことから0.1 mm以下の粒径を含まない配合とした。

(d) 実験方法

実施した実験の模式図を(図-8)に示す。

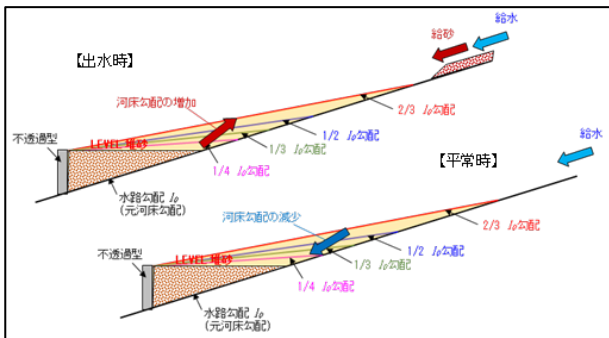


図-8 実験模式図

実験の初期条件は水路末端に不透過型砂防堰堤に見立てた高さ0.2 m (8.0 m相当)の板を設置し、砂防堰堤上流側を水平堆砂(Level1)で埋め戻した状態とした。水路最上流部に設置(置き土)した実験砂の上面に通水して平衡土砂濃度で土砂供給を行い堆砂勾配が最も急勾配になる時点まで給水し、この状態を計画堆砂勾配と想定して計測した。その後、清水のみを十分小さい流量で清水のみ供給し、溪床勾配の低下、あるいは溪床表面のアーモコート化により土砂移動が生じなくなるまで通水した。この状態を平常時堆砂勾配と想定して計測した。供給流量は土砂供給時に0.20 L/s(実スケール0.5 m³/s/m)、

0.40 L/s(同, 1.0 m³/s/m)、0.80 L/s(同, 2.0 m³/s/m)、清水供給時に0.10 L/sと設定した。供給土砂量は堰堤上流側を水路勾配の2/3倍の勾配で埋設可能な土砂量の2倍の量とした。実際の堰堤は堆砂域が溪床幅より広いことが多いため、追加検証として水路末端を3倍幅に拡張した勾配15度の水路において実験砂3条件を供給流量0.80 L/sで流下させ、堆砂敷きの拡張が堆砂勾配に与える影響も検討した。実験中は実験水路側面からビデオ撮影を行い、堆砂勾配の時系列変化を計測した。

5.2 実験ケース

実験ケースは、実験砂3条件(A砂、B砂、C砂)、水路勾配3条件(6度、10度、15度)、供給流量3条件(0.20 L/s、0.40 L/s、0.80 L/s)を組み合わせた27ケースおよび追加検証の3ケースを実施した。

5.3 実験結果

各実験ケースで得られた出水時から平常時までを想定した溪床勾配の変化範囲を実験水路勾配毎に整理し、(図-9)に示す。各バーの上の数字が計画堆砂勾配を、下の数字が平常時堆砂勾配を示す。なお、細粒土砂を主体としたA砂の実験では、実験中溪床が安定せず、周期的に溪床形状が変動するような状況であった。瞬間的かつ局所的な最大堆砂勾配を計測すると過大評価となるため、A砂のみ、給砂・給水を終了した時点の勾配を計測した。

水路勾配を急にすると計画堆砂勾配も急になる傾向が見られた。勾配および供給流量は変えず、実験砂のみ変えた場合、緩勾配かつ流量が小さいような掃流力の小さいケースを除いて、主粒径が大きい実験砂ほど計画堆砂勾配が急になった。各実験砂について堆砂勾配の特性を示す。

①実験砂A(真砂土を想定した土砂)

A砂では、掃流力の小さいケースを除いて計画堆砂勾配が水路勾配の2/3倍以下であった。平常時堆砂勾配は水路勾配によらず2度以下(平均で1.4度)で安定し、すべてのケースで水路勾配の1/4倍以下となった。

②実験砂B(石礫混じりを想定した土砂)

B砂では、計画堆砂勾配は概ね水路勾配の2/3倍より急であった。平常時堆砂勾配はA砂と同様に水路勾配によらず3度以下(平均で2.4度)で安定し、水路勾配の1/2倍以下となった。

③実験砂C(巨礫混じりを想定した土砂)

C砂では、水路勾配6度では土砂が堰堤模型まで十分に到達せず途中で停止したため堆砂勾配が他の実験砂よりも緩くなった。巨石混じりのC砂は勾配が10度以上の土石流下区間で評価すべきと考えられる。上記のケースを除いて、計画堆砂勾配は水路勾配の2/3倍以上になり、平常時堆砂勾配は水路勾配の1/2倍以上になった。これは、土対針で示された堆砂勾配の設定に一致した。

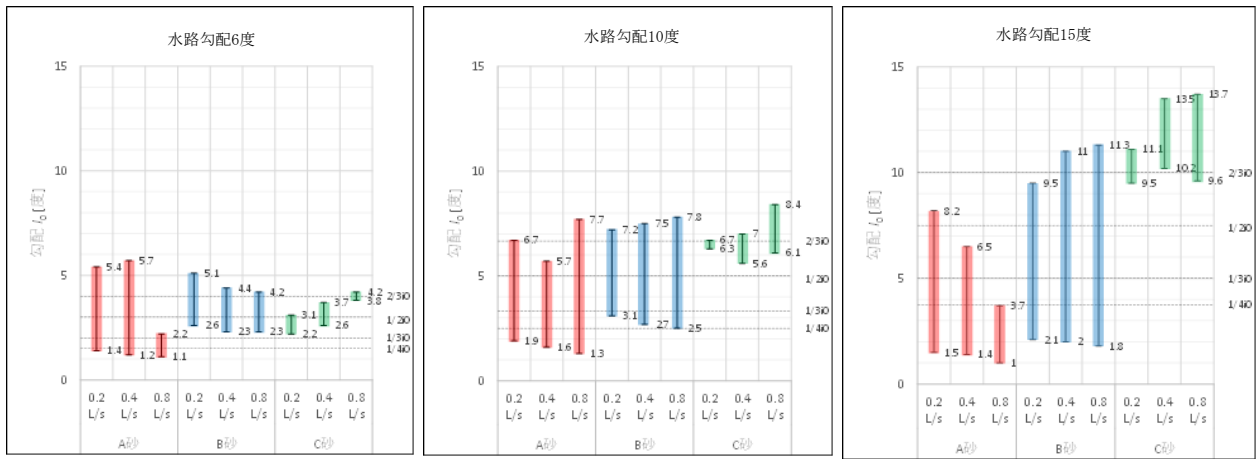


図-9 水路勾配と計画堆砂勾配及び平常時堆砂勾配の関係

また、堆砂敷きの影響を検討するために水路末端幅を拡幅して行った追加検証結果を以下に示す(図-10)。

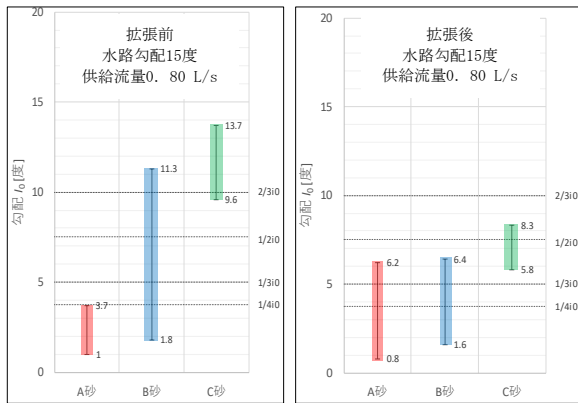


図-10 水路幅拡幅時の計画堆砂勾配および平常時堆砂勾配 (右: 拡幅前, 左: 拡幅後)

水路勾配15度・供給流量0.80 L/sの条件下で拡幅前と拡幅後を比較した。B砂およびC砂については拡幅前よりも計画堆砂勾配および平常時堆砂勾配が緩くなり、計画堆砂勾配が水路勾配の2/3倍以下となった。一方、A砂は拡幅前より計画堆砂勾配が急になった。拡幅により横断方向の堆砂量は増大した。A砂は横断面にそってほぼ平坦に均一に堆積したが、B砂、C砂は水路中央が低く、右左岸沿いが低くドーム状に堆積した。

5.4 実験考察

同一水路勾配および供給流量でも実験砂によって堆砂勾配が異なることがわかった。主粒径が大きいC砂は移動限界流速が大きいため掃流力が增大しても堆積することができたが、真砂土主体の土砂を想定したA砂では、掃流力が增大すると浮遊砂として移動してしまい堆積することができない。そのため、水路勾配15度のような条件ではA砂は供給流量が大きくなるほど堆積できず計画堆砂勾配が緩くなっていると考えられる。水路末端が拡幅した条件では、拡幅により流下断面が大きくなったことで流速が低減し

浮遊砂成分が少なくなったため、A砂は堆砂勾配が拡幅前よりも急になったと考えられる。一方で、B砂やC砂は水路勾配が相対的に緩勾配になったことで堆砂勾配も緩くなったと考えられる。

土対針では計画堆砂勾配および平常時堆砂勾配は溪床勾配の2/3倍および1/2倍とすると定められているが、実験から計画堆砂勾配および平常時堆砂勾配は土対針の指針より変動幅が広く、溪床材料の粒度分布によってはより緩勾配で土砂が堆積してしまい、既往の概念が適用できないことがあることが確認された。特に、A砂の実験では水路勾配が10度または15度時の計画堆砂勾配は水路勾配の2/3倍以下であり、平常時堆砂勾配は水路勾配によらず溪床勾配の1/4倍以下であった。

5.5 実験結果の活用

堆砂勾配検証実験により、想定どおり赤谷川右岸流域に多く分布する真砂土主体の土砂流出が懸念される溪流では主粒径が大きい溪流に比べて計画堆砂勾配および平常時堆砂勾配が緩勾配になることが示唆された。

粒径がある程度大きい場合や溪床勾配が急な場合は堆砂勾配も急になると考えられるため、堰堤の維持管理における計画堆砂勾配は溪床勾配の2/3倍とした。粒径が細かい場合や溪床勾配が緩い場合は堆砂勾配が緩くなると考えられるため、安全側を採用して計画堆砂勾配を溪床勾配の1/3倍として運用することとした。

6 時間軸を考慮した土砂捕捉量

前述までの検証で、砂防堰堤の堆砂勾配は概ね粒径に依存していることがわかっている。内田らは過去に発生した豪雨による土砂生産及び土砂流出の事例を分析し、斜面崩壊が流域からの土砂流出に影響する傾向は長くても数年程度であること、それは、崩壊土砂の相当量が当該降雨もしくは次の降雨で下流に運搬されるからであると指摘している(内田ら, 2014)。上流に大規模崩壊地を有する富士川では崩壊による土砂供給によって一時的に溪床の粒度分布が細粒化したものの数年後には粒度分布が粗粒化し

崩壊前に近い溪流に戻ったことが確認された(図-11).



図-11 堆積土砂の時間的変化の一例

これは、内田らが指摘したように、斜面崩壊イベント等により生産された土砂はその後常にも一定量ずつ供給・流出するのではなく、流出量や粒度分布が時間的に変化するからと考える。

赤谷川流域ではこの考え方を取り入れ、現在は大規模生産直後の比較的粒径が細かい土砂により溪流が覆われているものと想定する。その後、時間経過とともに粒度分布が変化し、粗粒化した土砂流出にも対応できるように時間経過を考慮した堆砂勾配の考え方を以下のとおり整理した。

【細粒土砂を多く含む土砂流出が活発な時期】

H29九州北部豪雨直後における治山堰堤や砂防堰堤での堆砂勾配(現溪床勾配の1/3倍)程度でしか堆砂しないと考え、この勾配以下の部分(計画流出土砂量・流木量分の容量)を除石管理することで計画捕捉量を確保する(図-12左)。

【細粒土砂の流出が抑制された時期以降】

粒度分布が粗粒化すると考え、土石流発生時は流出土砂の量、質の変化に伴い現溪床勾配の2/3倍の勾配で堆砂するとし、この勾配以下の部分(計画流出土砂量・流木量分の容量)を除石管理することで計画捕捉量を確保する(図-12右)。

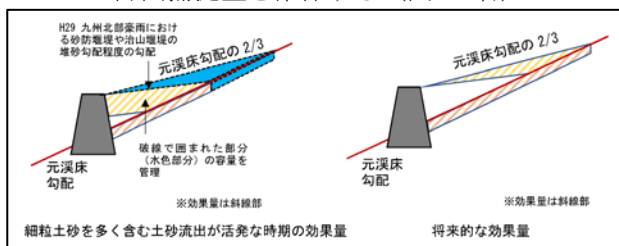


図-12 時間軸を考慮した堆砂勾配の考え方

具体的には、赤谷川流域では溪流の粒径変化をモニタリングしつつ、砂防堰堤の土砂管理を変更していくことを想定している。

7 溪流における粒径変化

赤谷川流域においては、平成29年7月九州北部豪雨以降の各出水イベント後に現地にて粒度分布調査を行っている。現在まで4時期、24地点にて溪床材料調査を行っている。溪流の溪床材料調査結果の一例を

以下に示す。(図-13)は、赤谷川中流付近に位置する溪流の溪床材料調査結果である。

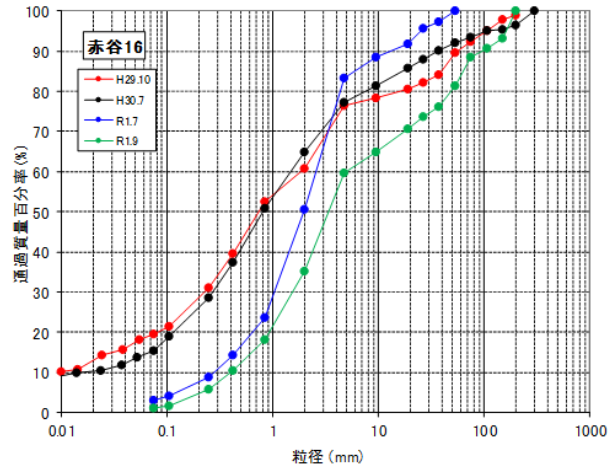


図-13 溪床材料調査結果

発災以降は溪床材料が徐々に粗粒化していることがわかる。その他溪流についても同様の傾向を示しており、各出水で細粒土砂が流されて大粒径の土砂が残ったこと、流出土砂量の減少や粒度分布に変化が生じたことが要因と考えられる。これらのことから、前述のとおり時間経過とともに粒度分布が変化し、堆砂勾配にも影響を与えることが示唆される。

8 おわりに

今回の報告では、赤谷川流域の土砂流出特性および時間的変化に応じた砂防施設設計の考え方について報告した。土砂流出現象は複雑であり未だ解決されていない事も多いが、基準のみにとらわれないことなく、流域の特性に合わせた施設設計を行うことが地域の安全度向上のために重要であると考えている。今後も調査や検証を継続していきたいと考えている。

九州北部豪雨復興出張所では、一日でも早い地域の安全・安心のために地域に寄り添いながら、関係機関とも一体となって復旧・復興に全力で取り組んでいるところである。今後とも設計や調査、地域の方々等との協議を進めるとともに、本復旧の更なる推進を図っていく所存である。

最後に、災害からの復旧・復興の推進に携わっていただいている関係機関及び建設業界の皆様のご尽力に対し、心より感謝申し上げます。

9. 参考文献

海堀正博：小流域での流出土砂量とそれに対する砂防施設の役割—特にダム堆砂勾配について—，広島大学総合科学部紀要IV理系編，第18巻，pp. 19-34，1992
 水山高久，井良沢道也，天田高白，小林幹男：砂防ダム堆砂測量資料の解析，新砂防，Vol. 43, No. 4, pp. 33-35, 1990
 内田太郎，丹羽諭，蒲原潤一：大規模土砂生産後の土砂流出，土木技術資料，Vol. 56, No. 10, p. 24-27, 2014