

ダム堆砂有効利用促進のための「ダム堆砂分級工法」の開発

一般財団法人水源地環境センター
一般社団法人ダム水源地土砂対策技術研究会

1 はじめに

国土交通省が策定した「ダム再生ビジョン」¹⁾では、既設ダムの機能を半永久的に維持していくとの理念に立ち、各ダムの堆砂特性等に考慮しつつ早期にダム堆砂対策を検討・実施することが望ましいとされている。これは対策の前倒しにより、その技術的難易度や投入コスト、環境負荷等を抑制するアセットマネジメントの考え方に基づくものである(図-1 参照)。

図-2 に詳細な分類を示すダム堆砂の掘削・浚渫に代表される排砂工法は、最も一般的な堆砂対策であるが、対象土に細粒分が多く含まれると、下流還元材としての適性や有効利用の用途が限定され、堆砂対策推進の障害となる場合も考えられる。

一般財団法人水源地環境センター(WEC)と一般社団法人ダム水源地土砂対策技術研究会(土砂研)は共同で、掘削・浚渫土の粒度改善を図ることにより土砂の品質を高め、有効利用先の拡大や下流還元量の増加させることを目的に、ダム堆砂対策への土砂分級技術の導入を検討している。

一般財団法人水源地環境センター(WEC)と一般社団法人ダム水源地土砂対策技術研究会(土砂研)は共同で、掘削・浚渫土の粒度改善を図ることにより土砂の品質を高め、有効利用先の拡大や下流還元量の増加させることを目的に、ダム堆砂対策への土砂分級技術の導入を検討している。

2 ダム堆砂分級工法開発の目的

図-3 に WEC と土砂研が考えるダム堆砂対策における土砂分級技術の適用コンセプトを示す。近年、ダム堆砂を下流還元するために置土する方式が採用される傾向にあるが、この場合、河床変動の抑制、河床材料の粗粒化改善、生物環境の維持・保全といった目的に応じた粒度分布を示す土砂を用いることにより、下流河川的环境改善効果が高まるものと期待される。また、掘削・浚渫土に含まれる細粒分を除去することにより、置土の固結化防止や、下流還元時の濁りの低減も期待できる。

ただし、置土による下流還元は洪水流を外力とする自然営力のみを利用する対策行為であり、これに細粒分除去過

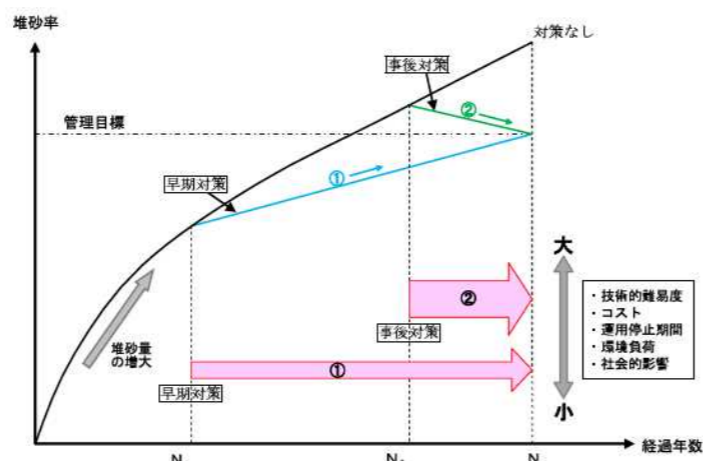
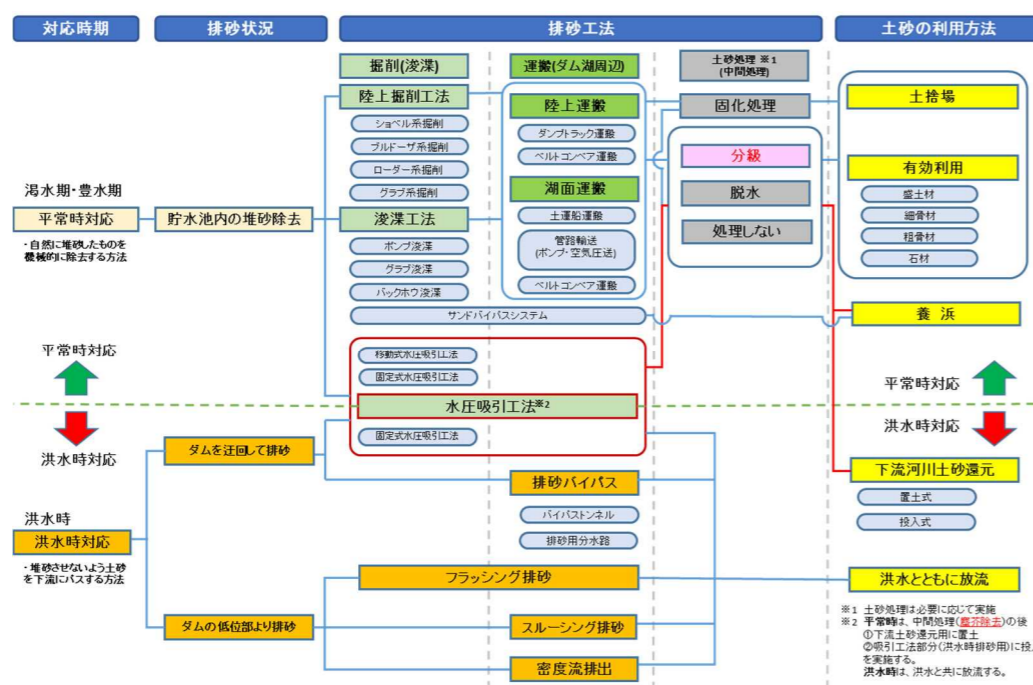
図-1 アセットマネジメントの堆砂対策への適用イメージ²⁾

図-2 排砂工法の詳細分類と実施フロー

程を追加することによるコスト増加は、ダム管理者への負担を増やすことになることを考慮すれば、低コストの細粒分除去技術が望まれる。

ダム堆砂については、分級処理をはじめ、脱水処理、安定処理、高度処理と段階別の処理やいろいろな有効利用が考えられており、その用途から建設利用、農業利用、窯業利用、環境利用に区分されることが知られている³⁾。砂や砂礫は、骨材、盛土材、埋戻材あるいは下流還元材に用いることができる。掘削・浚渫土の処理工程において、細粒分除去技術としての「ダム堆砂分級工法」の適用性が確認できれば、有効利用先に有償材として提供することを見込める、また、高機能な環境材としての利用価値が高まる等のメリットが生まれ、分級に掛かる費用(コスト)から便益(ベネフィット)として差し引くことが可能となる。

ダム堆砂を対象とした分級検討の事例⁴⁾はこれまでもあるが、分級特性は各ダムの堆積土砂の土質特性や確保できるヤード広さ、水処理の制約条件等などに影響を受けるため、対象サイトを選定しての現地実験やケーススタディを行い、ダム堆砂への土砂分級技術の十分な適用性を確認することが望ましい。そこで、①広範囲な分級レンジに適用できる技術、②多様な細粒分処理技術の提供を目標に、千葉県・高滝ダムにおいて「ダム堆砂分級工法」の現地実験を実施した。

3 高滝ダム現地分級実験の概要

高滝ダムは千葉県市原市にある洪水調節と水道用水等の利水容量を有する多目的ダムであり、平成2(1990)年に完成した(図-4 参照)。ダム流域の養老川の活発な土砂精算の影響を受け、H16(2004)年には堆砂が計画堆砂量の100%を超え、H30(2018)年時点の堆砂率は159%(=2,861千m³)に達している。ダム堆砂対策としての堆積土砂の掘削・浚渫が行われているほか、試験的な置土下流還元の実績も有する。現地分級実験は、高滝ダム管理事務所の協力の下、図-5 に示す上流側の導流堤上を実験ヤードとして実施した。実験期間は渇水期の2020年1月末～2月中旬とし、国・地方自治体・



近年、ダム堆砂を下流還元するために置土する方式が多く採用される傾向

- ・目的に応じた粒度分布 → 下流河川的环境改善効果
- ・置土土砂の細粒分除去 → 置土の固結化防止・下流還元時の濁り低減
- ・細粒分除去はダム管理者の負担増 → 低コスト技術が望まれる

ダム堆砂分級工法の現地実験の実施
【目的】①広範囲な分級レンジ、②多様な細粒分処理技術の提供

図-3 ダム堆砂対策における土砂分級技術の適用コンセプト

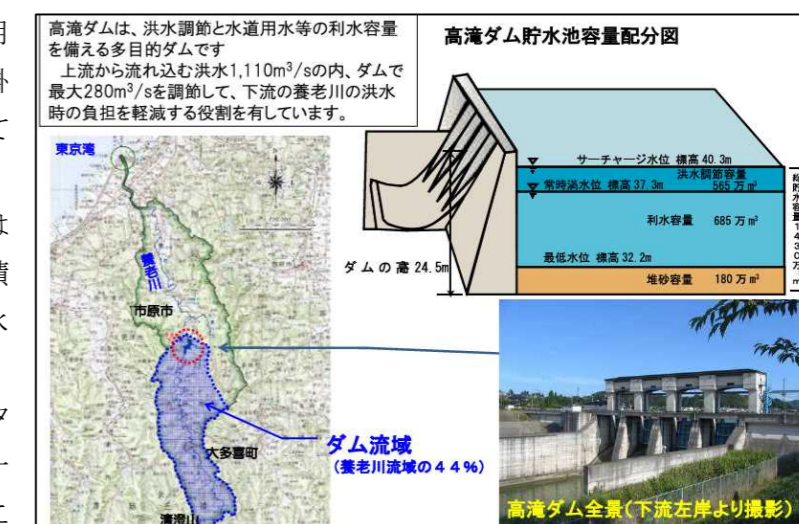
図-4 高滝ダムの概要⁵⁾

図-5 高滝ダム導流堤上の分級実験ヤード

関係法人・大学・民間企業から広く見学参加者を募る公開実験の形を取った。実験ヤードに、

図-6 に分級システム実機をセットし、実際の稼働状況を見学者に確認してもらった。

なお、実験のために入手した高滝ダム堆積土砂(原泥)は図-7 に示すとおり粗粒分が少ない細砂が主体であり、実験ではより幅広い粒径への対応を確認するため、粒度分布調整用の粗砂(ブレンド材)を混合して、試験用土砂(原泥+ブレンド材)を作製して使用した。

分級処理システムは、図-8 の平面配置レイアウト、および図-9 のシステム構成に示すとおり 10mm 以上の塵芥・礫を除去する前処理として回転篩に水洗浄を付加したトロンメル、2mm 以上の砂礫分を除く、除去する1次処理として振動篩に水洗浄を付加したハイメッシュセパレータ、0.075mm 以上の砂分を抽出する2次処理としてサイクロンと水処理を付加した振動篩を組み合せ、処理能力 50m³/日のシステムを構築した。なお、1次処理、2次処理の篩の工程は網目を変えることで、また2次処理のサイクロンは処理容量や流入圧力を変えることで分級レンジを変えることが可能である。2次処理を通過した泥水の水処理設備を用意した。なお、分級の過程で土砂解泥のために水洗浄(=湿式分級)を行うが、実験では2次処理後の泥水中の細粒土砂を凝集沈殿させた上水を再利用することとし、実験中にダム湖への放流等は行わないようにした。

この実験で選定した分級処理装置の組合せは、いずれも汎用性があり、安定した稼働実績を持つ機械設備の基本セットであり、ダムの持つ様々なニーズに合わせて、適切な機種・能力・セット数を組み合わせることが可能である。

実験期間：
2020年1月末～2月中旬
(見学会：2/5, 2/12, 2/14)

実験サイト：
千葉県高滝ダム上流側導流堤上

使用土砂：
高滝ダム堆積土砂(細砂)
→ 粒径調整に粗粒分を追加



図-6 現地実験概要と実験に用いた分級処理システム全景

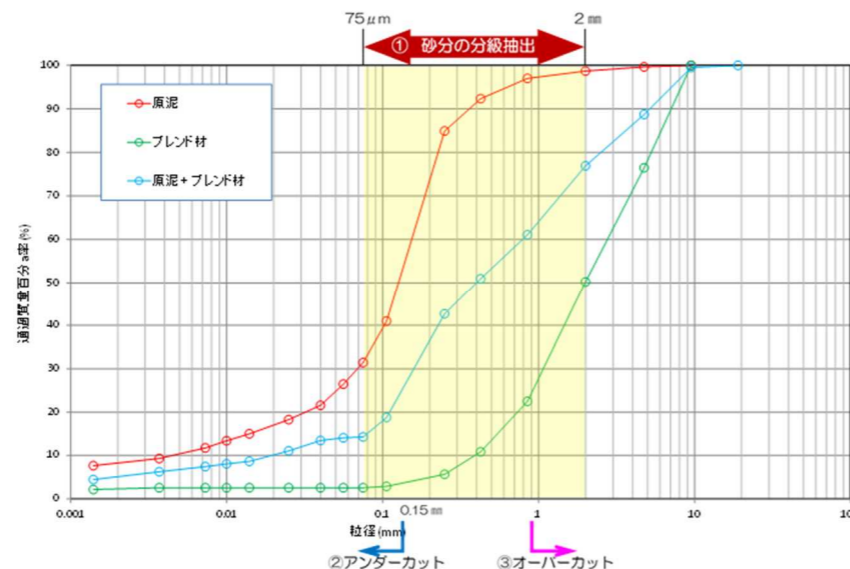


図-7 高滝ダム堆積土砂と試験用土砂の粒度分布

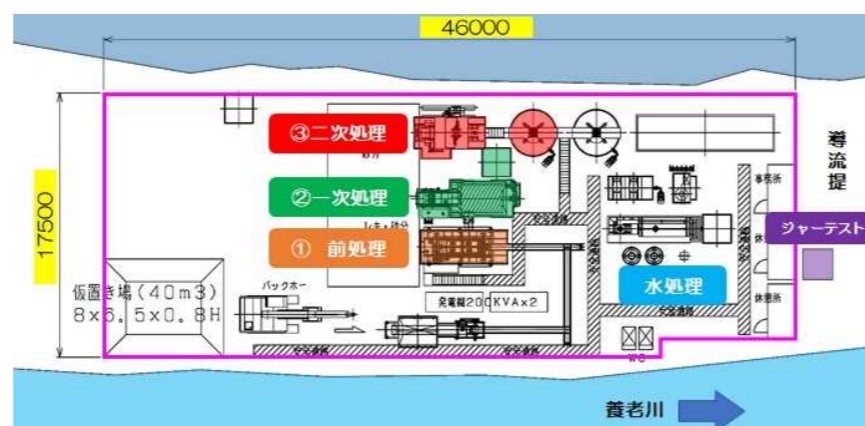


図-8 分級処理システムの平面配置レイアウト

4 現地実験の結果

4.1 分級処理土の品質

現地実験は、2019年2月5日、12日、14日の3回、見学会を兼ねた公開実験として実施した。1回あたり約 10m³ の土砂を前処理、1次処理、2次処理、水処理の各過程により分級処理を行った。分級結果のうち、2次処理により抽出された砂分(目標分級レンジ 0.075mm~2mm)の粒径加積曲線を図-10 に示す。

試験用土砂の混合は、当日の各実験開始前に行ったが、分級により得られる砂分の粒度はほぼ等しく、本システムによる高い分級処理品質の再現性が確認された。またオーバーカットレンジの 2mm の含有率をみるとほぼ 0%になっており、目的の性能が確認された。一方、アンダーカットレンジの 75μm の含有率は目標としていた 10%を概ね満足した。細粒分については、今回の試験ヤードと水処理の制約から水洗浄能力がやや不足していたと考えられること、また試験で用いた浚渫土砂が陸上ヤードに仮置されていたため、木切れや葉などが比較的多く混入し、これらに付着した細粒分も影響したと考えられる。

ただし、それでも表-1 に示すとおり、一般的な土木材料としての適用可能な細粒分混入率 10%程度であり、葉や木切れなどは比重分級や解泥工程を追加・改良することで除去できると考えられる。総体的には想定した分級レンジの処理性能が確認され、要求に応じた粒度品質の土砂を安定して供給できるシステムであると考えられる。

4.2 余水処理と細粒分処理

凝集処理を施した泥水の上水は、水質(濁度および pH)を管理したうえでダム湖内に放流した。その測定値を表-2 に示す。濁度は千葉県県の排水基準の最小値 20mg/L 以下を、pH は千葉県県の海域以外の排水基準(5.8~8.6)を満たしていることを確認した。

分級後の細粒分処理の過程で発生する濁水処理については、分級工程で用いた PAC+高分子凝集剤の他に、図-11 に示

◎ 分級システムの構成

・目標粒度：75μm~2.0mm(細粒分混入率の目標10%以下)
(篩網目やサイクロンの処理容量・流入圧力を変えることで分級レンジは可変)



◎ 細粒分を凝集沈殿処理する水処理設備



・分級の過程で土砂解泥のために水洗浄(=湿式分級)を行うが、今回の実験では2次処理後の泥水中の細粒土砂を、現地の水質環境基準を満たすPAC+高分子凝集剤により凝集沈殿させた上、洗浄水を循環・再利用することとした。(水使用量を抑制し、実験中にダム湖への放流等を行わない)

図-9 分級処理システムの構成

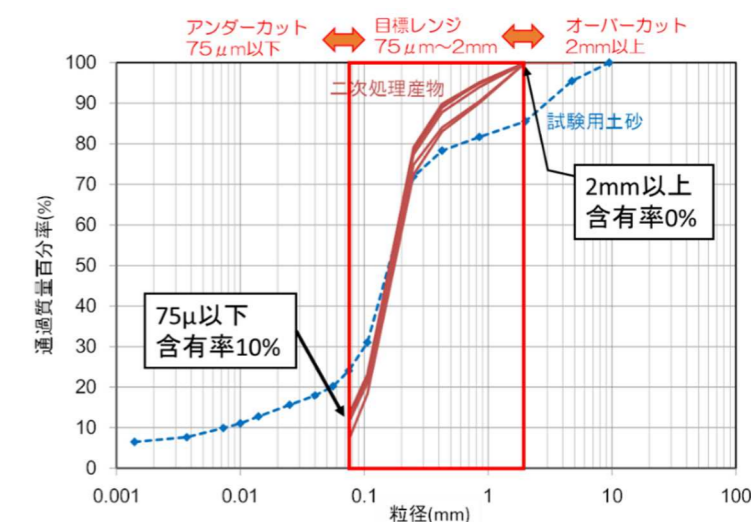


図-10 分級処理(2次処理)土の粒径加積曲線

表-1 利用分野別の土砂粒度範囲の例

利用分野	用途	粒度範囲(mm)	F _C の規定(実績)	備考
環境材	ダム下流還元(置土)	10以上~0.075	5%程度以下	佐久間ダムは20%程度
	養浜材	75~0.075	8%程度	茅ヶ崎海岸の事例
建材	珪砂(7号)代替材	0.3~0.075	18%程度	産地により異なる
地盤材料	埋戻し用砂	5.0~0.075	10%以下	
	SCP用・サンドマット用砂	5.0~0.075	10%以下	
コンクリート材料	SCP用・VD用砂	5.0~0.075	5%以下	圧密を期待
	SC細骨材(無筋・鉄筋・舗装)	5.0~0.15	2~10%以下	F _C は0.15mm以下
	SC細骨材(プレキャスト)	5.0~0.15	5~30%以下	F _C は0.15mm以下

表-2 放流時の水質測定結果一覧

日付	1/28	1/30	2/5	2/14	2/15	2/17
濁度	4	4	1	5	2	2
pH	7.2	7.1	7.4	7.3	5.8	7.1

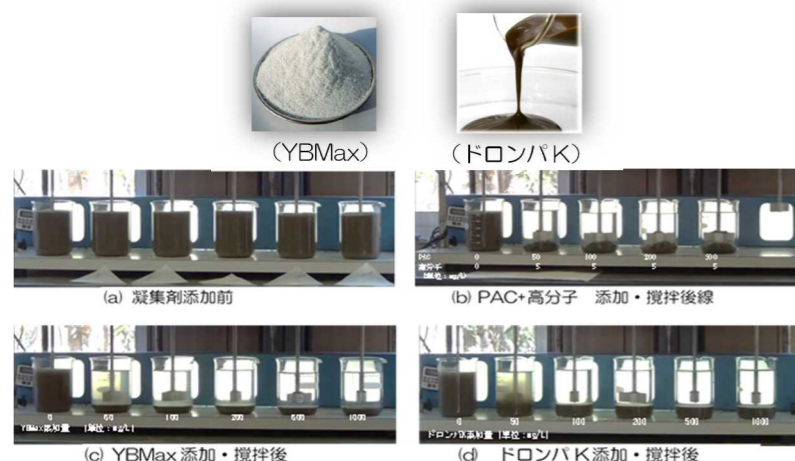


図-11 余水処理用各種凝集剤のジャーテスト状況



図-12 細粒分改質材(フトル・デコル)の適用状況

す自然由来の凝集剤(YBMax, ドロンパ K)の適用も検討した。その結果、ダムの堆積土砂性状や泥水濃度により添加量・沈降時間の影響を受けるものの、いずれの凝集剤も環境適合性が高く、泥水処理に十分適用可能であることを確認した。また、分級の最終残留物である細粒分(シルト・粘土)処理技術の一つとして、図-12に示す環境負荷の小さいペーパー・スラッジ系の改質剤(フトル、デコル)の適用性を確認した。その結果、別途経済性の検討は必要であるが、高滝ダム堆砂中の細粒分にも適用可能であることを確認した。

WEC と土砂研では、各ダムの諸条件に応じて適切な余水処理・細粒分処理の提案を行えるよう、この他にも各種技術メニューのリストアップを進めている。

5 ダム堆砂分級工法の経済性検討

5.1 分級コスト検討の必要性

高滝ダムで行った現地分級実験から、分級処理土を様々な利用分野で求められる所定の粒度範囲に制御可能であることが確認できた。一方で、分級プロセスを追加することはダム堆砂対策コストを増加させるため、分級により生み出される便益だけでなく、対策に係る費用を精度良く把握することが、事業の実施・継続判断に不可欠である。ここでは、高滝ダムを含めた立地条件や堆砂特性の異なるダムを対象に、分級コストと分級装置の配置計画について分析・評価を行う。ダムの選定にあたっては、分級機材の検討に必要な浚渫土の粒度分布が入手可能であること、さらに分級の目的として置土の固結防止や下流河川の濁り抑制が挙げられることから、置土による下流還元が実施されていることを前提とする。

5.2 分級コストの検討条件

今回、検討対象としたのは高滝ダムに加え、図-13に示す愛知県・矢作ダム、神奈川県・相模ダムおよび長野県・佐久間ダムの4ダムである。いずれも堆砂問題が顕在化し、貯水池内の堆砂浚渫・掘削工事が長期に亘り行われている

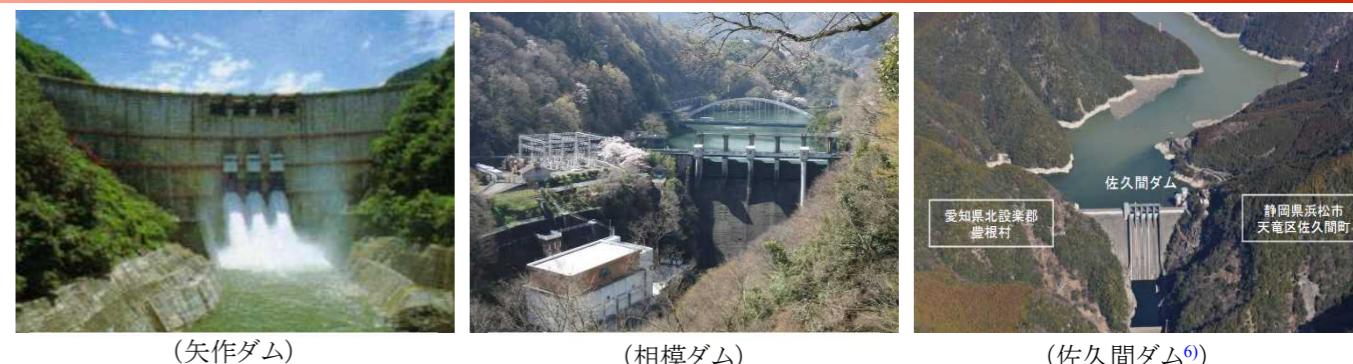


図-13 分級シミュレーションの対象ダム(高滝ダムを除く)

ほか、試験的な置土下流還元も実施されている。

各ダムにおける堆砂の粒度分布例を図-14に示す。分級シミュレーションは、この粒度組成を参考に行った。各ケースの検討条件を表-3にまとめる。年間処理土量は、各ダムの掘削・浚渫実績または公開されている計画に基づき最大土量を設定し、その50%の土量もケースに加えた。現地分級実験から分級過程で発生する余水(泥水)の処理コストが全体費用に占める割合が大きいことが明らかとなったため、余水処理の有無もケースに反映する。分級装置は新規購入とし、首都圏内の基地工場からダム現地まで陸送する。検討ケースは全16ケース(=4ダム × 2土量 × 余水処理有・無)となる。なお、分級処理装置は、高滝ダムでの現地分級実験と同様のシステム構成とし、処理土量に応じたセット数を配置するものとした。

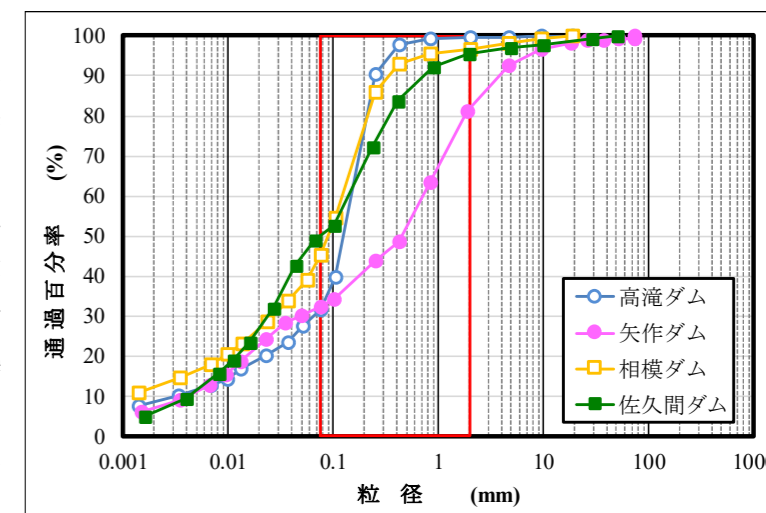


図-14 各ダムの堆砂粒度分布例

表-3 分級シミュレーションのケース

ダム名称	年間処理土量 (m ³)		余水処理		F _C (%)	装置運搬距離(km)
	最大	50%	有	無		
高滝ダム	100,000	50,000	有	無	32	10
矢作ダム	120,000	60,000	有	無	32	390
相模ダム	200,000	100,000	有	無	45	130
佐久間ダム	280,000	140,000	有	無	50	330

5.3 分級シミュレーション結果

分級シミュレーションで得られた年間処理土量と単位 m³ 当りの処理総コスト(以下、単位処理総コスト)の関係を図-15に示す。各ダム検討条件に応じて多少のばらつきは見られるものの、年間処理土量が50,000~280,000m³の間でその増加とともに単位処理総コストは減少する。また、同図中に示した余水処理「有り」に対する「無し」のコスト比は60%前後となり、これも処理土量の増加とともに漸減する。

図-17には、単位処理総コストをイニシャルコストとランニングコストに分解した場合の両者の比率を示す。処理土量や余水処理の有無に拘わらず、イニシャルコストが約80%を占めること

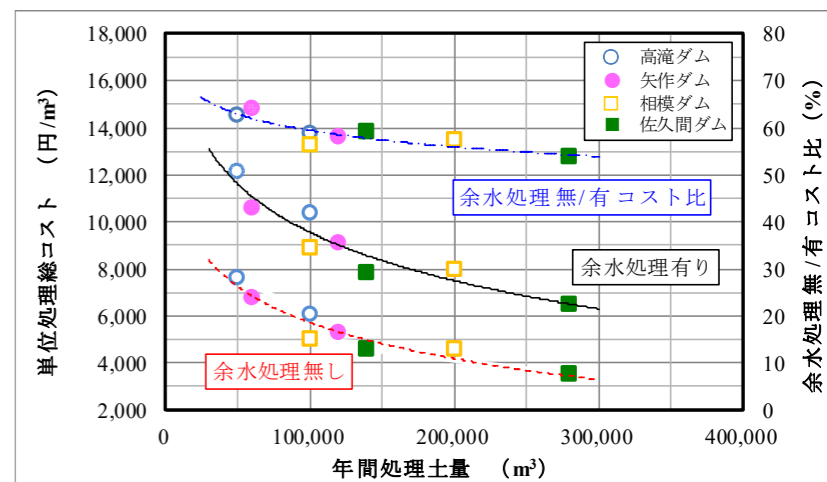


図-15 処理土量と単位処理総コストの関係

が確認できる。続いて、図-18には、単位処理総コスト中の各工事比率を示す。これによると、直接工事費が30%前後なのに対し、分級装置を始めとする機械購入費が全体の58~68%を占め、ダム毎の同じ処理土量の比較では、余水処理「無し」のケースが「有り」のケースに比べて、機械購入費の比率がやや下がる傾向にある。

5.4 分級装置の配置計画検討

ダム堆積土砂の分級工事の計画にあたっては、各ダムサイトの現場条件や分級の目的および分級後土砂の有効利用方法等のニーズを踏まえる必要がある。前出の分級コストの分析を行った4ダムのうち、現地実験で配置計画を行っている高滝ダムを除く3ダム(矢作ダム、相模ダム、佐久間ダム)を対象とし、分級装置の配置計画と検証を行った。

なお、ここでの分級装置の配置計画には、不確定要素の大きいダム堆積土砂の浚渫後処理(大きい礫・流木等の塵芥除去)用ヤード、および分級後土砂のストックヤードの計画は含めないものとする。また、配置計画を検討するうえで、余剰水の再処理利用の有無が装置配置に大きく影響する。そのため、年間処理土量と余水処理の有無によって、分級装置・余水処理装置の仕様と台数およびその配置計画のケースを分けて行うものとした。

分級処理の基本フローは、図-19に示す「配置パターンA」の一方方向となるが、用地の形状やアクセス道路の接続条件、および分級処理土量や処理回数に応じて効率的な配置計画を行う必要がある。ここでは、狭隘なダムサイト周辺の敷地を想定して、できる限りコンパクトな配置となる「パターンB」を選定する。なお、余水処理「無し」の場合は、図中の再生水のフローが省略となる。

5.5 分級装置の配置検討結果

検討結果の一例として、佐久間ダムの年間処理土量が検討ケース中最大の280,000m³、余水処理「有り」のケースの分級装置配置レイアウトを図-16に示す。分級処理装置は、高滝ダムでの現地分級実験と同様のシステム構成とし

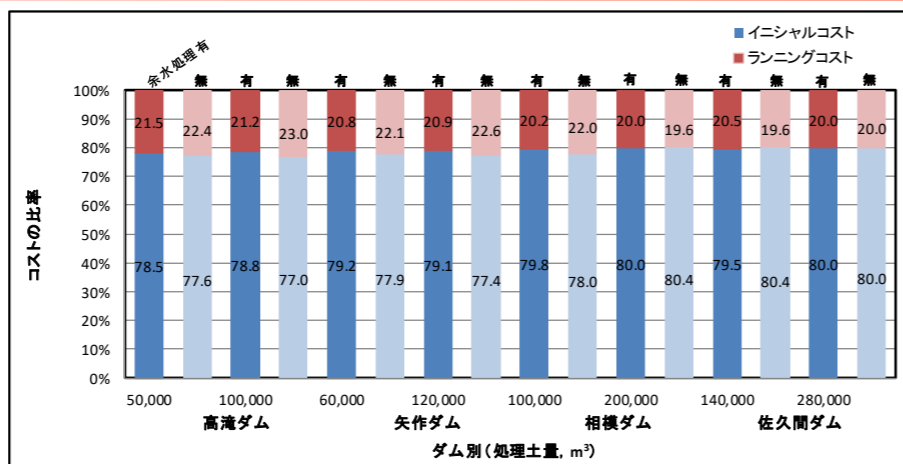


図-17 工事費に占めるインシャルコストとランニングコストの割合

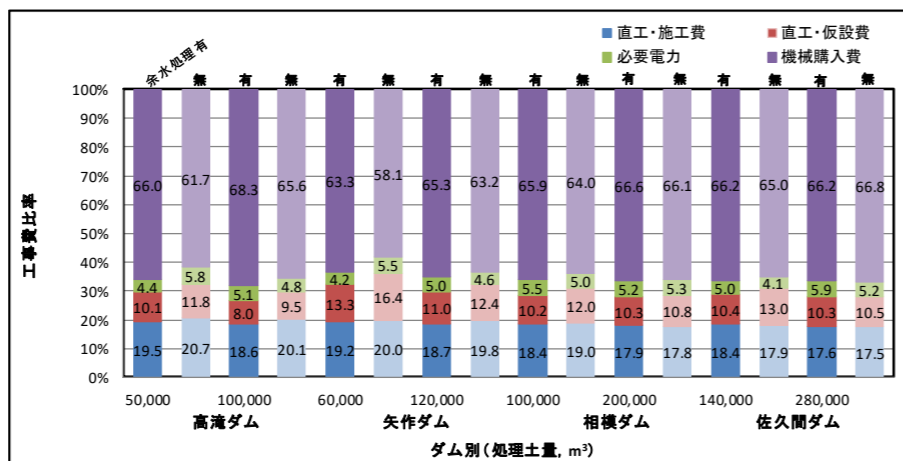


図-18 工事費に占める各費用の比率

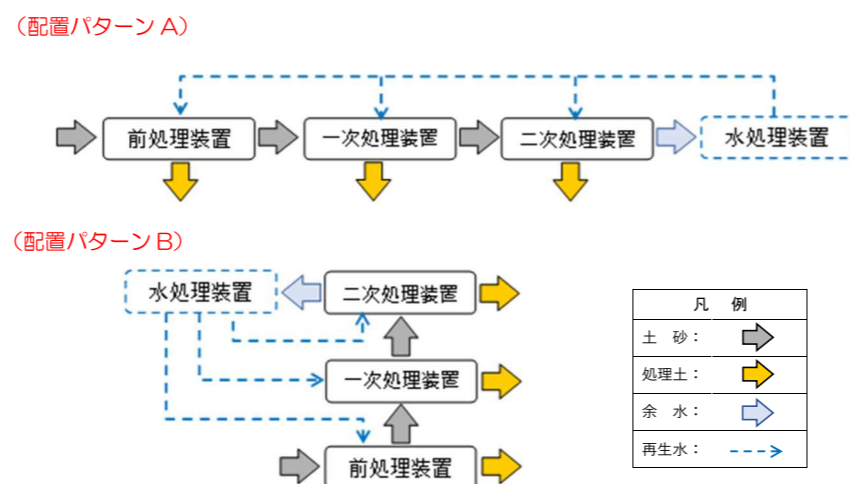


図-19 分級装置の基本配置パターン

ているが、処理土量の増加に対応するため、各処理段階の装置能力とセット数を増強している。この検討例の必要用地面積は、約5,250m²である。これに対し、余水処理「無し」のケースでは、汚泥貯槽など設備の一部が不要となり、必要用地面積は35%減の約3,450m²となる。

各ケースの検討から得られた分級処理装置の配置に必要な用地面積を図-20に示す。これから、処理土量約150,000m³までは用地面積がほぼ直線的に増加するが、それ以上では面積の伸びは緩やかになる傾向がある。

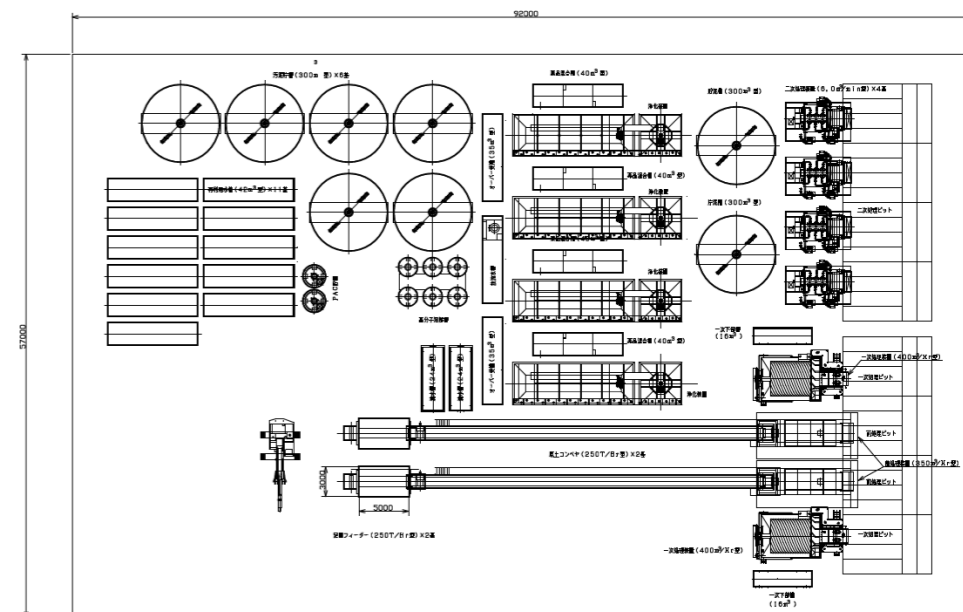


図-16 佐久間ダム(処理土量280,000m³、余水処理有り)の装置配置レイアウト例

6 まとめ

ダム堆砂対策を促進させるために、現地実験を通じて「ダム堆砂分級工法」の適用性を確認するとともに、現地導入に不可欠な分級処理コストと用地面積の分析を行った。

- ① ダム堆砂特性に合わせ、広範な分級レンジに対応できる分級工法の有効性を確認できた。
- ② まとまった堆砂土量を適切な能力の装置で効率的に分級処理すればコスト削減となり、用地面積の縮小にも繋がる。
- ③ インシャルコストが全体の80%を占めるため、長期運用で設備費を減価償却すれば、単年度コストを抑制できる。
- ④ 余水処理コストが約40%を占める。自然沈降で放流基をクリアできるケースでは、更なるコスト削減も可能となる。

以上、分級技術の導入により貯水容量回復メリットだけでなく、環境改善効果をもつ下流還元材や有価建設資材としてダム堆砂の再生を促進させる効果が十分期待できる。「ダム堆砂分級工法」のコストを抑え、ベネフィットを最大化させるための検討を、今後とも継続して行きたいと考える。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局:ダム再生ビジョン, 2017. 6.
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局:ダム貯水池土砂管理の手引き(案), 2018. 3.
- 3) 大矢通弘・角 哲也・嘉門雅:ダム堆砂リサイクルのコスト分析とPFIによる事業化検討, ダム工学, No.13(2), pp.90-106, 2003.
- 4) 角 哲也・小坪洋巳・久保田明・三反畑勇・天明敏行・小高志郎:ダム堆砂の簡易処理・河川還元に関する研究, ダム工学, No.19(3), pp.165-171, 2009.
- 5) 千葉県ホームページ:養老川の河床変動と高滝ダムの堆砂について
- 6) 国土交通省 中部地方整備局 浜松河川国道事務所:天竜川ダム再編事業 恒久対策工法検討委員会 第1回委員会資料, 2016. 2.

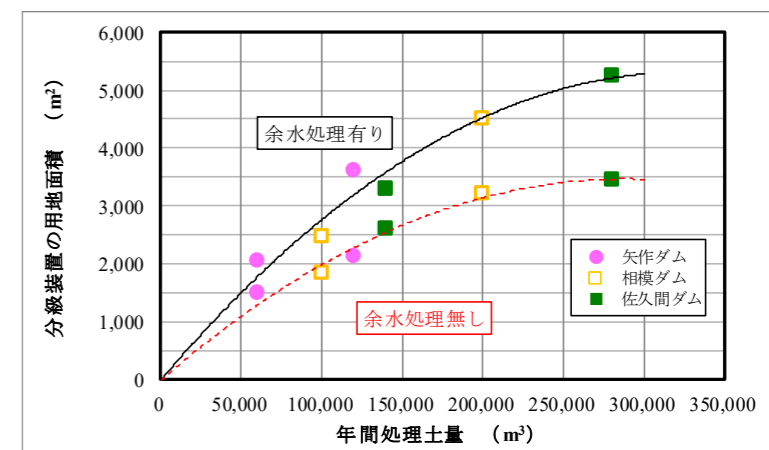


図-20 処理土量と分級装置の用地面積の関係