

美和ダム再開発湖内堆砂対策施設の 水理模型実験による国内初の施設検討

加藤博¹・大谷賢治¹

¹中部地方整備局 三峰川総合開発工事事務所 工務課 (〒396-0402 伊那市長谷溝口1527)

三峰川総合開発事業では、既設美和ダムの洪水調節機能の増強を図るとともに、貯水池への堆砂を抑制し、洪水調節機能を保全するための湖内堆砂対策施設の建設に向けた事業を現在進めている。この湖内堆砂対策施設は、ダム湖内に堆積した粒度の細かい土砂を上流に一時ストックしておき、既設の土砂バイパス運用に合わせて洪水の掃流力を利用してバイパストンネルへ排砂する施設である。この方法は、国内では前例の無い排砂方法であり、確実な排砂を可能とするため数値シミュレーションや模型実験を行い、施設検討を行った。本稿はこの施設の検討過程及び結果について報告するものである。

キーワード：ダムの洪水調節機能維持、湖内堆砂対策施設、水理模型実験

1. はじめに

美和ダムは、天竜川上流域の最大支川の三峰川に、洪水調節、発電及びかんがいを目的として1959(S34)年に建設された多目的ダムである。美和ダムの位置と現在の諸元を図-1.1に示す。



図-1.1 美和ダム位置図

三峰川は、南アルプス仙丈ヶ岳(標高3,033m)を源に、中央構造線に代表される多様な断層、脆弱な地質、急峻な地形を流域に有しており土砂生産量が多く、洪水時には大量の土砂が流出する。美和ダムでは、建設当時の堆砂計画として当時予測された年堆砂量40年分の659万m³の堆砂容量を確保していたが、図-1.2に示すように、完成後3年間で約680万m³の土砂が流入し、当初計画堆砂容量を超えている。更に、1982(S57)年、1983(S58)年の洪水で約600万m³の土砂が流入するなど、その後の洪水でも大量の土砂が堆積してきた。また、美和ダムに堆積する土砂は、粘土及びシルトの占める割合が多いという特徴がある。

1966(S41)年度より、砂利採取により貯水池内の掘削が行われ、応急的な対応が行われてきたが、大量の流入土砂には対応ができず、抜本的な堆砂対策が求められていた。

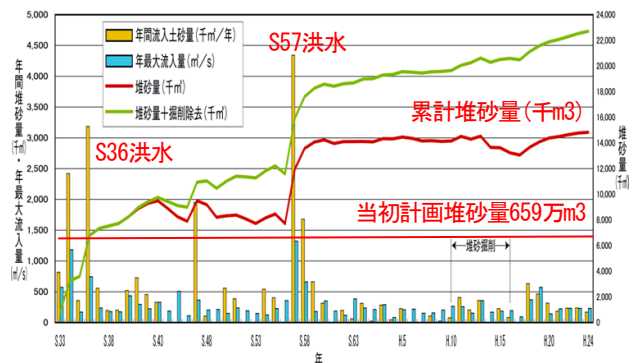


図-1.2 美和ダム堆砂量等の推移

そこで、1990 (H2) 年度より堆砂の進んだ貯水池の洪水調節容量を回復するための堆砂掘削と、貯水池の堆砂を抑制するための恒久堆砂対策を目的とした再開発事業を実施している。2012 (H24) 年度に特定多目的ダム建設事業から河川総合開発事業へと転換した、現在の再開発事業のメニューを図-1.3に示す。

堆砂掘削は、2005 (H17) 年度までに洪水調節容量分の約200万m³の掘削を完了している。恒久堆砂対策のうち、土砂バイパス施設は2005 (H17) 年度に完成し、貯砂ダムで捕捉できない流入土砂のうち47%を下流へバイパスする計画であり現在試験運用中である。また、バイパスされずに貯水池へ流入する土砂のうち、貯水池に堆積し治水機能に影響を及ぼすものについては、湖内堆砂対策施設により貯水池内の治水容量を保全する。本稿は、この湖内堆砂対策施設の検討について報告するものである。

なお、美和ダムの排砂計画は河川総合開発事業化にともない見直しが行われており、年間の土砂収支は、図-1.4に示すように美和ダム湖内の計画対策量は年3万m³としている。

2. 湖内堆砂対策施設の概要

ダム湖内に堆積した土砂の対策案として、水中掘削して土質改良し土捨て場へ運搬する案や、出水時に吸引ポンプでダム下流へ排出する案など5案の比較検討を行った。その結果、コスト面、施設操作の容易性及び出水時の機械的なトラブルリスクの面から、土砂バイパストンネル

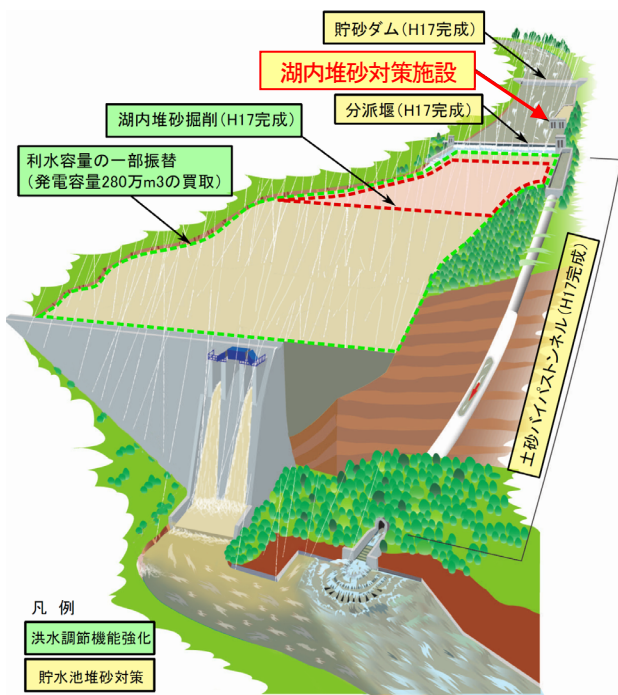


図-1.3 美和ダム再開発の事業メニュー

ネル流入部の上流に土砂のストックヤードを設置する案が有利と判断され、その方法についての検討を実施した。

具体的には、分派堰上流に土砂を貯めておくためのストックヤードを建設し、非洪水期に貯水池内の堆積土砂を浚渫し、ストックヤード内に送泥・集積する。その後、出水によりバイパス放流を行う際に、出水の掃流力でストックヤード内の土砂をバイパストンネルへ排砂させるものである。このような排砂方法は、国内では前例のない初めての方法である。湖内堆砂対策システムの概略イメージを図-2.1に示す。

3. スtockヤードの機能と課題の検証方法

湖内堆砂対策施設の構築にあたり、土砂のストックヤードに必要とされる機能を以下に示す。

- ・既設土砂バイパス施設の機能を阻害しないこと
- ・ストックヤード内に集積された土砂が上流部からの導水により確実に排出され、排出された土砂が確実にバイパストンネルに排砂されること
- ・計画対策量である最大3万m³の土砂を集積可能な容量を有すること

また、これらの機能を確保するためには以下の課題があげられた。

- ①分派堰上流の流況への影響のないストックヤードの配置。
- ②バイパストンネル内の維持や下流影響を考慮し、粒径の大きな土砂(φ5mm以上)をトンネルへ流下させないこと。

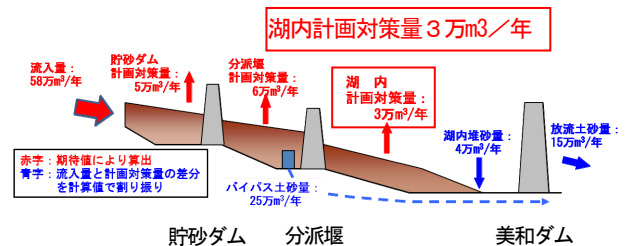


図-1.4 土砂収支図

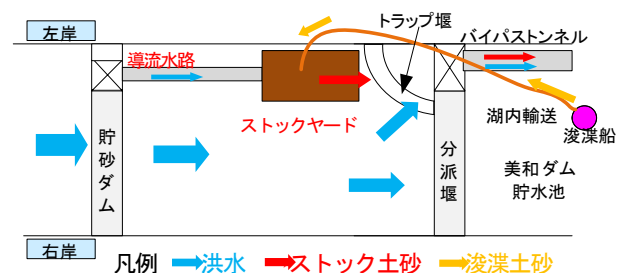


図-2.1 湖内堆砂対策システムの概略イメージ

③ストックヤードに集積する土砂は粘性を有する細粒成分が主体であり、確実な排砂と濁度をコントロールするためにその侵食メカニズムを把握すること。

これらの課題を解決するために、①については分派堰上流域の数値シミュレーション及び全体模型実験、②については全体模型実験、③についてはストックヤード部分を抽出した模型実験を実施し確認を行った。

また、前述の必要とされる機能のうち、ストックヤード内に集積された土砂が確実に侵食・排出されることについては、既往の研究¹⁾結果より、美和ダムの堆積土において局所的な激しい侵食が始まる侵食限界摩擦速度は0.044m/sという結果を参考とした。そこで、ストックヤードの形状を検討するにあたっては、ストックヤード内で最も摩擦速度が低下するヤード底部下流端で摩擦速度0.044m/s以上を確保するものとした。

4. 数値シミュレーション

(1) 平面2次元河床変動解析

計画する施設が、既存の河川流況に及ぼす影響を平面2次元河床変動解析により確認し、施設の配置・基本形状を検討した。ストックヤード幅は60m、80m、100mで行い、必要容量(3万m³)を確保できるよう延長を変化させ設定した。

また、ストックヤード下流からバイパス流入部にかけては形状が複雑であり、3次元的な流れが想定されるが、ここでは平面的な流向流速を把握することにより、排出された土砂がバイパス側に流れるかどうかについて検証するものとした。シミュレーションモデルは、分派堰、トラップ堰、水制工などの既設構造物、検討対象であるストックヤードを表現できるよう、メッシュを分割(メッシュサイズ約3~6m)した。

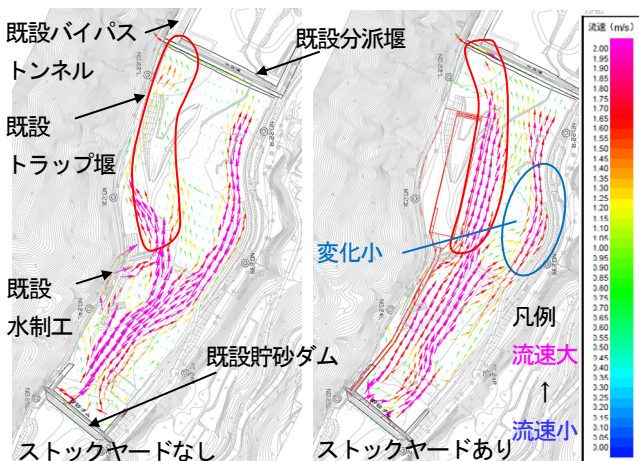


図-4.1 スtockヤードの有無による流況の変化

(2) 解析結果

過去の中小洪水の波形でシミュレーションを行い、図-4.1に示すのは、比較的多量の湖内堆砂が生じた洪水の波形で、幅60mで計算したときの流入ピーク時の流速ベクトル図である。ストックヤードを設置したことにより、バイパスへ向かう流れがストックヤードに沿った流れに変化するものの、ストックヤード端部からはバイパスへ向かう流れとなっている。また、幅60m以下ではストックヤードの範囲の流況は変化するが、右岸側の流れなど河道部の流況は大きく変化しないということが確認できた。

5. 水理模型実験

既存施設の機能への影響は、平面2次元河床変動解析を実施して確認を行ったが、局所的な流れの変化など、数値解析では確認できない事項を確認することを目的として、分派堰上流域全体を対象とした1/50縮尺の水理模型実験を併せて実施した。

また、ストックヤード本体の機能のうち、ストックヤード内に集積された土砂が上流部からの導水により確実に侵食・排出され、排出された土砂が確実に土砂バイパストンネルに排砂されることを確認する必要があるが、これらについては、対象土砂が粘着力を有する微細粒土砂であることから、解析での検討が困難である。このため、ストックヤード部分を抽出した1/25縮尺の水理模型実験により確認を行うこととした。これらの実験の検討フローを図-5.1に示す。

なお、本施設の検討に際し、有識者等による美和ダム再開発湖内堆砂対策施設検討委員会を設立し、2013(H25)年7月から2014(H26)年6月まで5回にわたり開

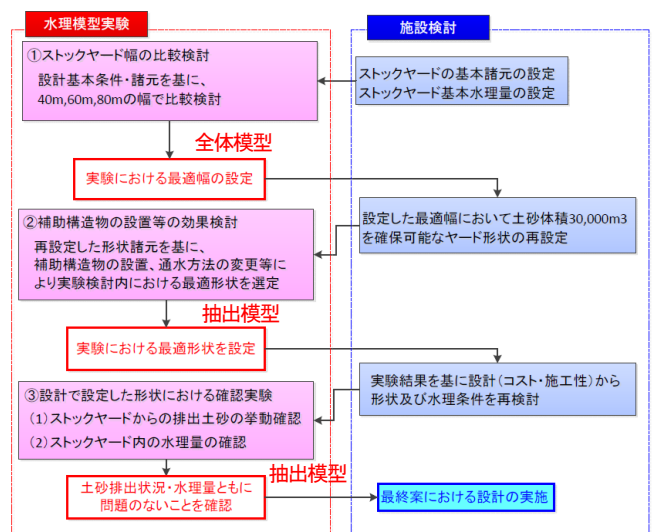


図-5.1 実験の検討フロー

催し、湖内堆砂対策施設の排砂方法に関する技術的な課題を明らかにするとともに、施工性、操作性及び維持管理を含めたトータルコスト削減の観点から、助言をいただいている。委員会のメンバーを表-5.1に示す。

(1) 全体模型実験 (1/50縮尺3次元模型実験)

(a) 既設施設への影響確認

既設土砂バイパス施設の機能を阻害しない施設配置・形状を、1/50縮尺の3次元模型実験により確認を行った。

ストックヤードが河道流況に与える影響を把握するため、ストックヤード形状を変化(幅80m・60m・40m)させ、流量4ケースの分派堰へ貯砂ダムまでの河道区間における流況、水理量(流速分布、水位縦断)及びバイパス水路への分派流量を計測した。なお、浮遊砂については色素により流れの観察を行っている。

この結果、ストックヤード設置箇所近傍の河道内の流況は異なるものの、分派堰近傍においては流況の差異が小さく、各幅ともに分派堰上流水位とバイパス流量の関係に明確な差異は生じなかった。また、ストックヤードより排砂された土砂は全量がバイパストンネルに流れていくことを確認できた。ただし、幅60m案では死水域内に収まるため分派機能への影響はないが、幅80m案では死水域から流心側に張り出す影響で、右岸沿いの水面形では他のケースと比較して水位変動が0.2m程度大きくなるということが確認された。図-5.2に流量1200m³/s時の比較状況を示す。

表-5.1 湖内堆砂対策施設検討委員会メンバー

美和ダム再開発湖内堆砂対策施設検討委員会	
◎鈴木 徳行	名城大学 名誉教授
○角 哲也	京都大学 教授
○檜谷 治	鳥取大学 教授
○溝口 敦子	名城大学 准教授
○箱石 憲昭	(独) 土木研究所 上席研究員
○櫻井 寿之	国土技術政策総合研究所 主任研究官
○中部地方整備局河川部	広域水管理官
○天竜川ダム統合管理事務所	事務所長
○三峰川総合開発工事事務所	事務所長
※1 ◎は委員長、○は委員	
※2 所属及び役職は当時のもの	

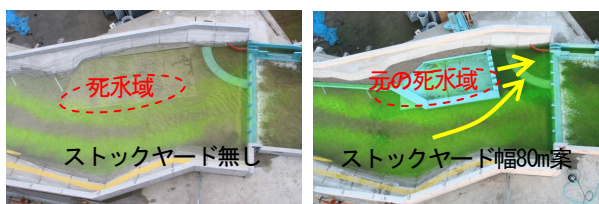


図-5.2 スtockヤードの有無による分派流況

(b) スtockヤードから排出される土砂の挙動確認

Stockヤード堆積土砂に含まれる砂礫成分をバイパスに流下させない方策として、図-5.3に示すようにStockヤードと既設トラップ堰の間に離隔を確保し、砂礫成分をトラップ堰で捕捉することとしている。離隔はバイパストンネルの摩耗・損傷に大きく影響する5mm以上の礫成分を捕捉する規模として25mで設定し、確認を行った。

実験は、後述する抽出模型実験で得られた結果により、Stockヤード幅40m・隔壁ありの形状で行い、下流端の流速が最も大きくなる状況を想定し、Stockヤード内は満砂状態を固定床で再現した。また、土砂条件は、対象粒径を5mm、10mm、20mmの3粒径とした。

この結果、砂礫分は、全ての流量条件において概ねトラップ堰の上流側に堆積し(約97%)、懸念されていたバイパスへの砂礫分の流入は殆どなく、トラップ堰上流面で砂礫分を捕捉する効果を確認できた。図-5.4に分派堰地点流量600m³/s、片側通水時の砂礫の排出状況を示す。

(2) 抽出模型実験

(a) みお筋の発生と対策 (1/25縮尺3次元模型実験)

Stockヤード内に集積された土砂の確実な排砂を実現するには、侵食メカニズムを把握する必要があり、Stockヤード部分を抽出した1/25縮尺の3次元模型で実験を行った。Stockヤード幅をパラメータ(60m、40m)として、Stockヤード内に堆積させた疑似河床(0.1mmの均一砂)の排出状況及び排出過程において、土砂の排出時にみお筋の形成による侵食部と非侵食部の発生が確認された。

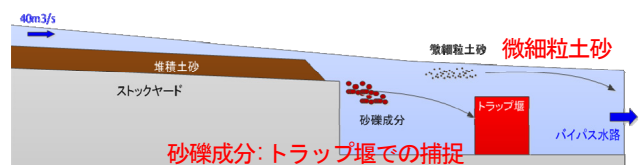


図-5.3 期待する土砂性状ごとの分級状態

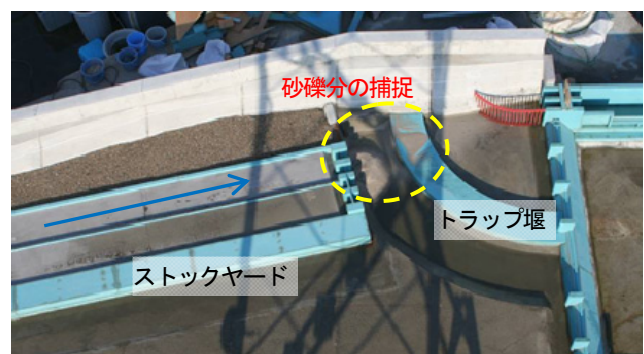


図-5.4 スtockヤードからの砂礫の排出状況

これは、図-5.5に示すように、落下流による法肩侵食が上流端に達したのち、再堆積した土砂を部分的に排出し、図-5.6に示すようなみお筋が形成され、ストックヤード内に土砂が残るものであった。このように、非侵食部が発生し陸地化すると、一回の運用で排砂されなかった場合に次回以降のストックヤード運用時にも排出されにくい状況になる可能性がある。そのため、みお筋が発生しないこと、発生したみお筋が固定化されないような対応が必要となる。

形成されたみお筋は蛇行しており、ストックヤード幅が広がるほどその振幅が大きくなる傾向がある。これは、ストックヤード幅が広い場合、みお筋の河床勾配が緩くなることにより、流水のエネルギー損失が大きくなり、流水力による土砂排出能力が低下すると考えられる。したがって、ヤード幅を極力小さくすることが望ましい。

そこで、ヤード幅を小さくするために隔壁を設置し、隔壁の有無、及び隔壁設置時の通水条件（全幅・片幅）をパラメータとして隔壁の設置効果を確認した。この結果、図-5.7に示すように隔壁の設置により、みお筋の蛇行幅を抑えることで、流下距離の増加に起因する摩擦速度の低下を軽減させることができた。

また、この実験の中で、空虚時の摩擦速度を0.044m/s以上に設定するためには各ケースのうち、ストックヤード



図-5.5 疑似河床における土砂排出状況のイメージ

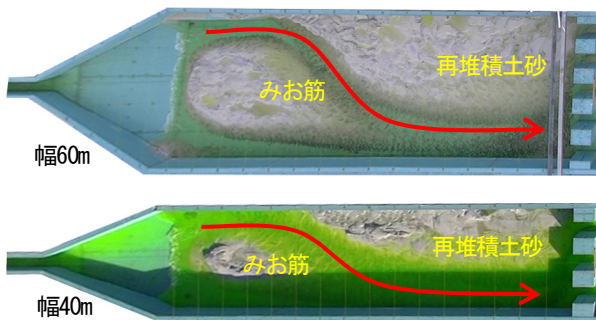


図-5.6 みお筋の形成状況

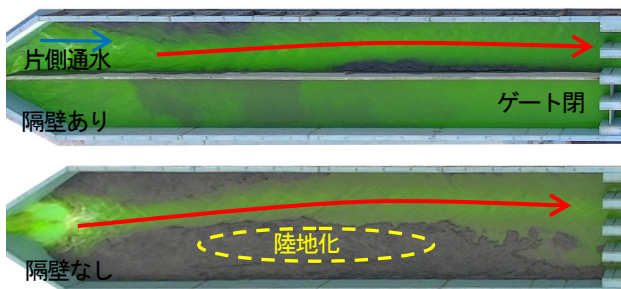


図-5.7 隔壁の有無によるみお筋の形成状況の比較

ト幅は40m程度が望ましいということが確認できた。

故に、これまでの実験の結果を踏まえ、幅40m、長さ220m、土砂の堆砂高4mとし、土砂が効率的に排砂できるよう中央に隔壁を設置したストックヤードの形状と配置にすることを決定した。

(b) 模型縮尺効果の確認（縮尺1/25と1/15との比較）

ストックヤード土砂の排砂時における下流濁度は、環境影響への観点より至近数年の最高値以下とすることとしたが、土砂を下流濁度に応じた濃度で排出するためには、ゲート操作等でコントロールし、濁水濃度を考慮して施設検討を行う必要がある。

そこで、縮尺の異なる2実験の結果から、法肩侵食の進行速度を算出し、縮尺による排砂速度の違いを比較することとした。図-5.8は縮尺1/15（幅7.5m 2次元模型）と1/25（幅40m）の実験開始から1時間後の法肩侵食位置の比較である。この各実験データをまとめて比較した、模型縮尺と法肩侵食速度の関係を図-5.9に示す。

この結果より、模型規模が大きくなるほど、すなわち実機に近づくに従い、より法肩侵食速度が速くなると想定できる。また、この実験で、土砂の粒度分布や圧密の状態により図-5.10に示すように侵食の形態が異なる（法肩からの侵食、表面の侵食）ことなどが確認され、土砂の侵食状況の予測に必要な情報が得られた。

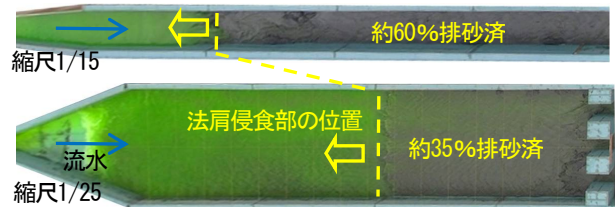


図-5.8 異なる縮尺模型での排砂速度の比較

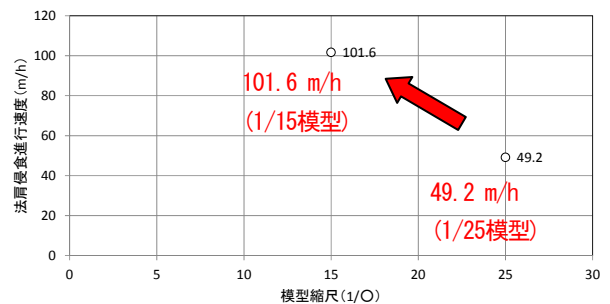


図-5.9 模型縮尺と法肩侵食進行速度の関係

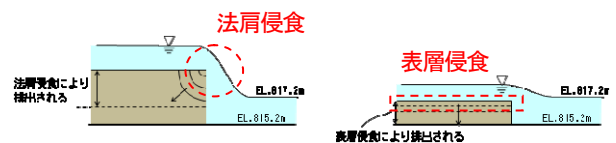


図-5.10 スtockヤード内土砂排出イメージ

(3) 現地土砂模型実験 (1/5縮尺2次元模型実験)

粘着性土砂の場合には流れの条件と粘着性の相似条件を同時に満足することができないため、模型実験において流砂運動の相似性を確保することができない。即ち、実機での運動を再現するためには実物の試料と実スケールの水理量が必要となる。模型縮尺効果の確認により実機規模では、ここまでの縮尺模型実験の結果よりもさらに排砂の進行速度が大きくなることが予想され、濃度の急上昇や侵食土砂が塊状で排出されることが懸念された。

その対応策として1/15より実機に近い縮尺の模型実験を行い、既実施したスケールの結果と合わせて外挿により実機スケールの排砂速度を想定し、施設設計に反映することとした。本実験では、それを1/5縮尺2次元模型で行い、美和ダムに堆積した土砂を試料とし、土砂の圧密(大・小)、土砂の堆積厚、流量を変える等の全7ケースの実験を行った。

(a) 縮尺効果の確認及び堆砂土砂の圧密による影響

法肩侵食の形態は模型縮尺によって異なるが、侵食速度に関しては、模型が大きくなるに従って速くなっていることが、この実験でも確認された。また、ストックされる土砂は集積から排砂まで数ヶ月以上経過した状態での運用となることから、実運用での法肩侵食速度は、図-5.11に示す、圧密された試料のケースの約240m/hと推測された。

侵食形態は、図-5.10のイメージで示した、法肩侵食で大部分の土砂が排出されたのち、表層侵食により残った土砂が排出される現象が再確認された。実機では、法肩侵食は約1時間程度で終了し、表層侵食により残土を全て流出させるためには、約40時間程度の時間が必要と想定される。

(b) 浚渫土砂に礫が混入した場合の影響

本実験において、投入土砂に礫が混入した場合、図-5.12に示すように表面土砂の粗粒化が確認されたため、

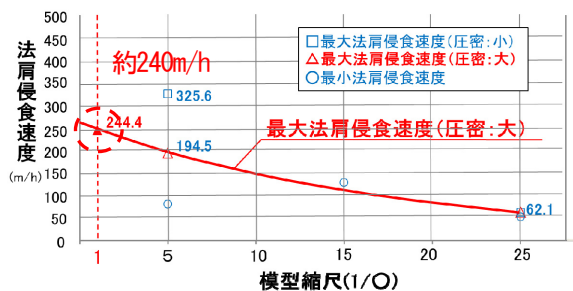


図-5.11 圧密と法肩侵食速度の関係



図-5.12 土砂の排出状況

礫分を除去した試料で実験を行った。その結果、設計条件摩擦速度 ($u_* = 0.053 \text{ m/s}$ としている) では、圧密された土砂でも完全に排出することが可能であることを確認できた。また、これに留意し、実運用ではストックヤード投入前に砂礫分の除去を行うこととした。

6. 検討結果を踏まえた設計方針

ここまでの検討結果を踏まえ、空虚時の摩擦速度を 0.044 m/s 以上に設定するためストックヤード幅は 40 m とし、みお筋の蛇行を抑えるため隔壁を設けることとした。ストックヤードの下流端は、土砂バイパストンネル内への粗粒分の流下を抑えるためトラップ堰からの離隔 25 m を確保することとした。また、取水施設は、土砂バイパス運用を行う $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 流入時に $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上を取水することとした。施設の完成予想図を図-6.1に示す。

7. おわりに

各模型実験により、計画する湖内堆砂対策施設は必要とされる機能を確保していることを確認したほか、計画時には想定していなかった土砂の侵食メカニズム、みお筋の現象等が新たに確認でき、施設設計で対策をおこなうことができた。

現在は、維持管理・コスト縮減等に留意しながら施設設計を行い、運用等の検討を進めており、今年度より施設本体の工事に着手したところである。施設完成後は、実運用の中で試験運転により排砂濃度をモニタリングしながら、運用方法を確立していく所存である。

謝辞：本施設の検討にあたり、助言を賜りました委員会の皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所「貯水池および貯水池下流の流れと土砂移動モデルに関する研究」(H18~H22)

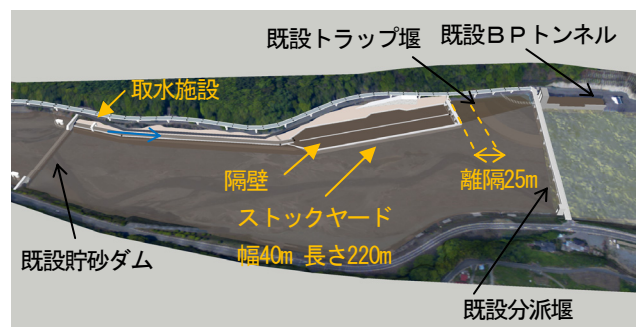


図-6.1 完成予想図