

排砂バイパスの設計体系に関する研究 — 中間報告 —

Study on systematic design of sediment bypass tunnel (Interim report)

研究第二部 上席主任研究員 川谷逸樹
研究第二部長 加藤宏基

ダム貯水池における堆砂はその進行に伴い、ダムの洪水調節容量や利水容量の減少による治水・利水機能の低下を招くだけでなく、貯水池自体の寿命を短縮する要因となることが懸念される。堆砂が進行しているダムにおいて治水・利水機能を維持していくためには、何らかの堆砂対策を講じることが必要不可欠である。堆砂対策の代表的な排砂工法としては、掘削・浚渫、フラッシング排砂、スルーシング排砂、排砂バイパス、密度流排出、水圧吸引工法などが挙げられる。これらの工法選定にあたっては、各ダムにおける貯水池特性や堆砂特性などを考慮した上で効果的かつ効率的な工法を選定することが重要である。

本研究は、上記の排砂工法のうち、我が国において汎用性の高い工法の一つと考えられる「排砂バイパス」に焦点をあて、その設計体系化を目的としたものである。本稿は、国内外の実施事例を参考として、計画・設計・管理にあたっての検討項目や留意点の抽出、コスト構造分析結果について報告するものである。

キーワード：ダム堆砂対策、排砂バイパストンネル、設計体系

Reservoir sedimentation, not only leads to a decrease in flood control and water utilization function by reduction of storage capacity for flood control and water utilization, is feared to be causes for shortening the life of the reservoir itself. In order to maintain the dam function for flood control and water utilization, reservoir sedimentation measures are essential for dam. The typical sedimentation measures are excavation and dredging, flushing, sluicing, sediment bypass tunnel, density current venting, Hydro-suction Sediment Removal System and the like. In the method selection, it is important to select an effective and efficient method in consideration of the characteristics such as reservoirs and sedimentation at each dam. This study focused on "sediment bypass tunnel" which is considered as one of the highly versatile sediment flushing technology in Japan, is for the purpose of its systematic design. This paper is the interim report of this study. In this paper, it is described considerations, points and the results of cost analysis at when planning, design and management with reference to the domestic and international implementation cases.

Key words : Reservoir sedimentation measures, Sediment bypass tunnel, Systematic design

1. はじめに

ダムは流水を貯留することによる洪水調節、各種用水の供給、水力発電等を行うことで、洪水などの水害による自然災害から国土や国民の生命・財産を守るとともに、効率的な水利用を通じて、国民生活の向上や産業の振興に貢献してきた重要な社会資本である。

一方、我が国は地形が急峻で地質も脆弱であるため、大雨・豪雨の発生などによって、山地から生産された大量の土砂が河川に流出して、ダム貯水池内に流入・堆積する。こうした貯水池における堆砂が進行すると、ダムの洪水調節容量や利水容量が減少して治水・利水機能の低下を招くだけでなく、堆砂が貯水池の寿命の制約条件となる場合も出てくる。

このため、ダム堆砂問題に対して、貯水池をいかに維持管理し、ダム機能を確保していくかということが重要な課題となっており、堆砂が計画以上に進行しているダムにおいては、堆砂対策の適切な実施が必要不可欠である。また、対策実施にあたっては、各ダムの特性に応じた効果的かつ効率的な対策を講じることが重要である。

本研究は、ダム堆砂対策における排砂工法のうち、現在、国内の実施事例は少ないが、我が国の河川状況に広く適合し、汎用性の高い工法の一つと考えられる「排砂バイパス」の設計体系化を目的としている。

本稿は、国内外における排砂バイパスの実施事例を参考として、計画・設計・管理にあたっての検討項目や留意点の抽出、コスト構造分析結果について報告す

るものである。

2. ダム貯水池の堆砂状況と排砂工法の概要

(1) 全国におけるダム貯水池の堆砂状況

全国における国土交通省、水資源機構所管ダムでは建設後50年を経過しているダムが増加しており、堆砂による治水・利水機能への影響が懸念されている。

図-1に示すように、計画堆砂容量に対する堆砂量の割合は全国平均で40%程度である。また、地域別では、中部地方と四国地方が80%前後で突出している。

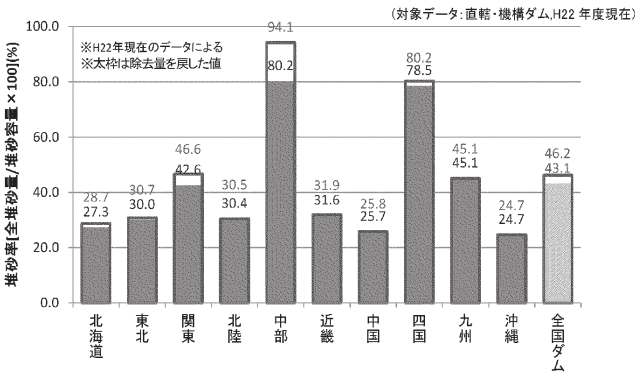


図-1 ダム貯水池堆砂率

(2) 排砂工法の概要

ダム貯水池の堆砂対策において、貯水池内の堆積土砂・流入土砂の除去には排砂技術が必要であり、その工法として従来、掘削・浚渫が多く採用されてきた。掘削はバックホーとダンプトラックにより、浚渫はポンプ浚渫またはグラブ浚渫と土砂運搬船またはポンプ圧送により行われていることが多い。貯水池から搬出した掘削土は、土捨場まで運搬して埋立処分する、あるいは骨材や客土として有効活用するといった方法で処理する必要がある。しかし、土捨場の容量は有限であり、ダム近傍の土捨場が受入不可となれば、より遠方の土捨場へ運搬することになるため、持続可能性や経済性の面での課題がある。骨材等への有効活用についても、需要と供給のバランスや需要地までの運搬距離などの諸条件によって同様の課題が発生する。

一方、掘削・浚渫以外には、表-1に示すような排砂工法があり、いずれもダム下流河川への排砂(流砂)を基本としている。このため、下流河川における治水・利水・環境面での課題の有無を考慮する必要がある。

表-2に排砂工法の概要と特徴を示す。各工法の長所・短所を踏まえ、貯水池特性・堆砂特性・洪水特性・周辺環境などを勘案した上で、当該ダム貯水池に適した工法を選定することが重要である。

本研究で対象としている排砂バイパスは、洪水時に

貯水池流入水を、ダムを迂回させて下流河川へ直接放流するため、排砂による下流河川環境への負荷が比較的少ないことが特徴である。

表-1 主要な排砂工法の分類

対応時期	排砂手段	排砂工法
平常時対応	機械的土砂移動	掘削・浚渫
		下流河川土砂還元
		水圧吸引工法
洪水時対応	ダムを迂回して排砂	水圧吸引工法
		排砂バイパス
	ダム低位部より排砂	フラッシング排砂
		スルーシング排砂
		密度流排出

表-2 排砂工法の概要・特徴

排砂工法	工法の概要	特徴(長・短所)
掘削・浚渫	<ul style="list-style-type: none"> バックホーやグラブ浚渫船等による堆砂除去 ダンプトラックやポンプ圧送等による土砂輸送 	<p><長所>特別な設備が不要</p> <p><短所>土砂の仮置きスペース確保が必要、土砂運搬に制約あり</p>
下流河川土砂還元	<ul style="list-style-type: none"> ダムからの掘削土砂等をダム下流河川の高水敷等に設置 洪水の首力で流下 	<p><長所>特別な設備が不要</p> <p><短所>土砂を置くスペース確保が必要、土砂流量は発生した洪水に依存</p>
水圧吸引工法	<ul style="list-style-type: none"> 水位差を利用したサイフォンの原理で土砂を吸引してダム下流河川へ流下 	<p><長所>省エネ、排砂濃度の調節が可能</p> <p><短所>技術開発途上、流木・塵芥等による吸引口・排砂管の閉塞・損傷</p>
排砂バイパス	<ul style="list-style-type: none"> 分派堰から分流した洪水・土砂をバイパストンネルによりダム下流河川へ流下 	<p><長所>分派率に応じた流量見合いの流砂量を排砂(河川環境への負荷が比較的小さい)</p> <p><短所>トンネル建設費が高価、分派堰が必要、摩耗対策が必要</p>
フラッシング排砂	<ul style="list-style-type: none"> 貯水池に堆積した土砂を洪水の掃流力を利用してゲートからダム下流河川へ排砂 	<p><長所>ゲート操作による確実な排砂が可能</p> <p><短所>貯水位の低下が必要、排砂ゲートが必要、摩耗対策が必要、自然河川に比べて大量に土砂が流下する場合あり</p>
スルーシング排砂	<ul style="list-style-type: none"> 貯水池に流入した土砂を洪水の掃流力を利用してゲートからダム下流河川へ排砂(通過) 	<p><長所>ゲート操作による確実な排砂が可能</p> <p><短所>貯水位の低下が必要、排砂ゲートが必要、摩耗対策が必要</p>
密度流排出	<ul style="list-style-type: none"> 密度流の発生に合わせて流入濁水や底層に堆積した細粒分をゲートからダム下流河川へ放流 	<p><長所>細粒分の効率良い排砂が可能</p> <p><短所>密度流の発生が必要、低標高の放流口・ゲートが必要、放流のタイミングを図るのが難しい</p>

3. 本研究の概要及び検討の流れ

(1) 排砂バイパスの利点及び堆砂対策としての現状

排砂バイパスは、トンネル建設に伴う初期費用が高価であるが、①ダム堤体を改造せずに土砂管理施設を新設できること、②貯水池の水位低下が不要で貯水量の損失が無いこと、③洪水時の貯水池流入水を直接放流するため、排砂による下流河川環境への負荷が比較的少ないことなどが利点として挙げられ、我が国の河川状況に広く適合した有用かつ汎用性の高い排砂技術の一つであるといえる。

しかし、国内における排砂バイパスの実施事例は少なく、施設計画・設計の体系化がなされていないのが現状である。今後、ダム貯水池の堆砂は確実に進行していくことから、排砂バイパスの設計体系化を図ることの意義は非常に大きい。

排砂バイパスの設計体系化を図るにあたっては、設計体系を整理するための「観点」を定め、その観点に基づき必要な諸検討を進めていくことが重要である。

(2) 設計体系を整理するための「観点」

排砂バイパスは、ダム堆砂対策施設として位置づけられるため、その設計体系化を図るにあたっては、「計画」、「設計」、「管理」の3つの観点を基軸として検討することが必要と考えられる。

各観点における検討の基本的な考え方を示す。

○計画論： 排砂バイパス施設は、必要かつ適切な規模や配置検討を行い、効率的な運用により、排砂効果を最大限発揮することができるように計画することが重要である。このため、排砂バイパストンネルの対象流量、トンネルの平面線形・縦断線形、分派ルールの設定、分派対象の土砂量・粒径など、バイパス施設の基本諸元や配置に関わる事項について「計画」の観点から検討する。

○設計論： 排砂バイパス施設は、設定したバイパスの計画排砂量（流下量）を安全かつ確実に流下させることはもとより、施工性や経済性、将来的な維持管理面に配慮した形状・構造の施設設計を行うことが重要である。このため、トンネルの断面形状、分派堰・トンネル呑口部・トンネル吐口部等の構造、トンネル部等の摩耗対策など、施設の形状や構造に関わる事項について「設計」の観点から検討する。

○管理論： 排砂バイパス施設は、対象粒径として掃流砂を含む場合には、施設内を通過する砂礫による摩耗損傷への対応（点検・補修等）を考慮した維持管理が重要である。また、施設を継続的に運用していくためには、施設を通過した土砂の放出先であるダム下流河川における物理環境・生物環境への影響を把握する必要がある。このため、施設の点検方法、補修方法、ダム下流河川におけるモニタリング方法など、施設の維持管理や適切かつ持続的な排砂に関わる事項について「管理」の観点から検討する。

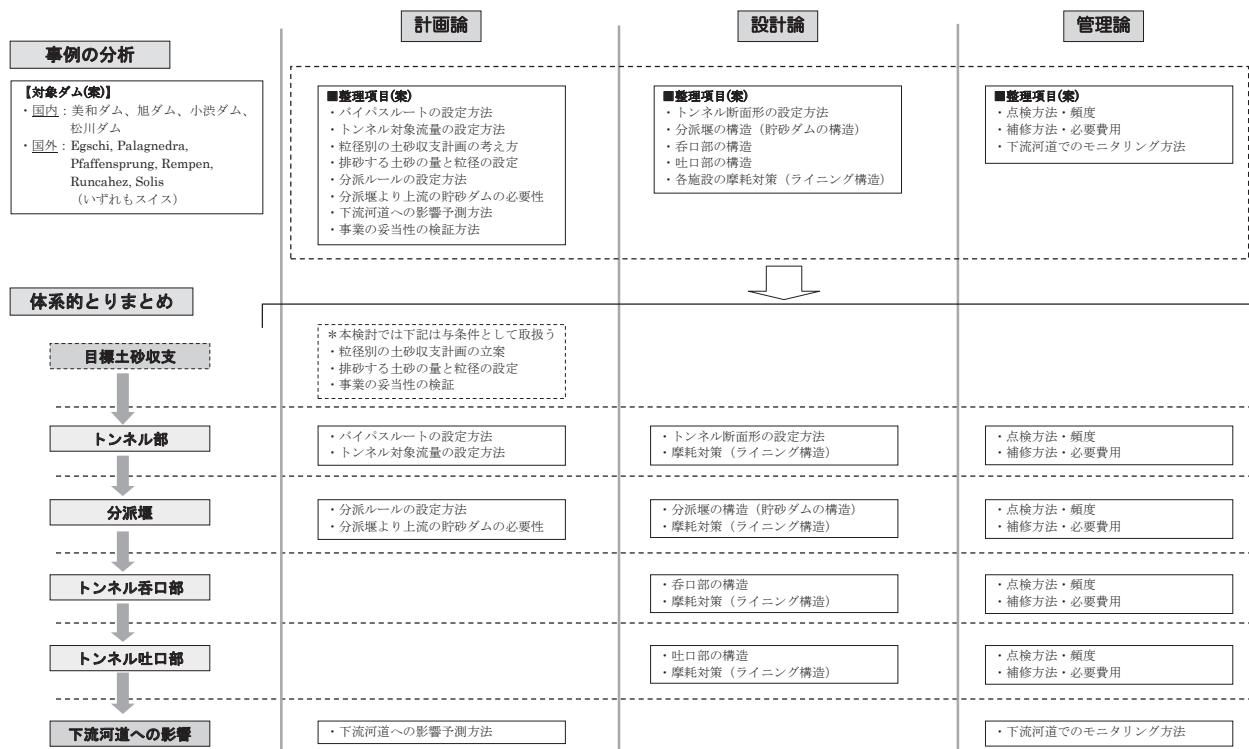


図-2 研究の概要

(3) 本研究の全体的な検討の流れ

本研究の全体的な流れは前頁の図-2に示したとおりである。

まず、事例分析を行い、分析結果をもとに、計画・設計・管理の各観点における整理項目及び設計上の留意点を抽出する。

次に、実際のダムを対象としたケーススタディを実施する。そのケーススタディにおいては、排砂バイパスの施設を主要な部分（トンネル部、分派堰、トンネル呑口部、トンネル吐口部）に区分した上で、抽出した設計上の留意点を踏まえた具体的な施設検討を行う。ここで、計画・設計・管理の各観点での留意点に配慮することができたか否かを確認するとともに、新たな課題が抽出されれば、その対応を追加して検討する。

最後に、各部分における検討結果、ならびにダム下流河道への影響に関する検討（影響予測方法やモニタリング方法等）を合わせて、体系的なとりまとめを行う。

(4) 事例分析に基づく基礎的検討の流れ

本稿で示す研究の中間報告の内容は、排砂バイパスの事例分析に基づく基礎的検討の部分である。この検討部分の流れを図-3に示す。

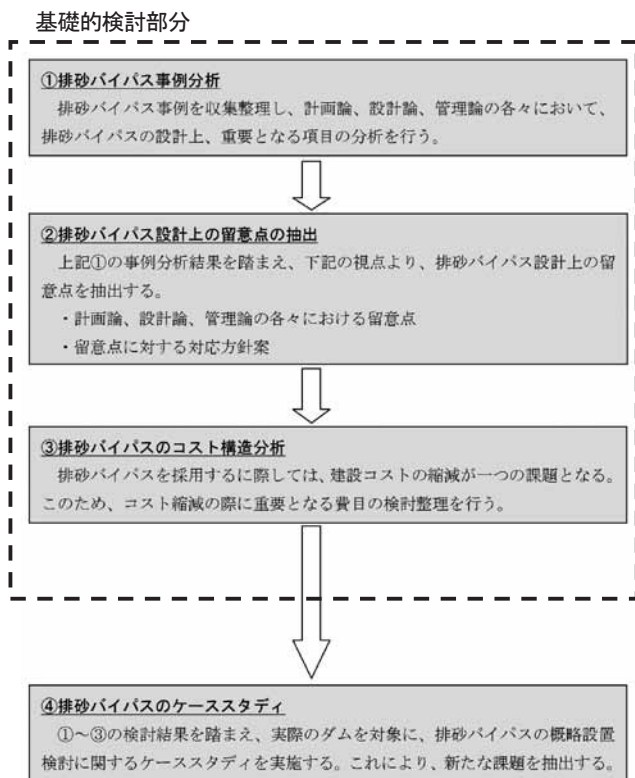


図-3 事例分析に基づく基礎的検討の流れ

4. 研究の中間報告

(1) 事例分析

a) 分析対象ダム

排砂バイパスの事例として、建設中の施設も含めて下表に示す国内4ダム、海外6ダム（全てスイス）を対象に分析を行った。各事例における主要な施設諸元を表-3に示す。

表-3 分析対象ダム

	ダム名	建設年	トンネル			設計流量 m ³ /s	対象粒径 mm
			断面形状・規模	延長 m	勾配 %		
国内	美和	2004	馬蹄形 2r=7.8m	4,308	1.0	300	ウォッシュロード
	旭	1998	幌形 3.8×3.8m	2,383	2.9	140	dm:50 d90:300
	小渋	—	馬蹄形 2r=7.9m	3,984	2.0	370	—
	松川	—	幌形 5.2×5.2m	1,417	2.0	200	—
海外	Egschi	1949	円形 D=2.8m	360	2.6	50	dm:100 d90:300
	Palagenedra	1978	円形 D=6.2m	1,760	2.0	220	dm:74 d90:160
	Pfaffensprung	1922	馬蹄形 4.7×5.23m	282	3.0	220	dm:250 d90:2700
	Rempen	1986	馬蹄形 3.45×3.42m	450	4.0	80	dm:60 d90:200
	Runcahez	1962	幌形 3.8×4.27m	572	1.4	110	dm:230 d90:500
	Solis	—	幌形 4.4×4.68m	968	1.9	170	—

b) 事例分析結果

「計画」、「設計」、「管理」の各観点について事例分析の主な結果を以下に示す。

①計画

■トンネル対象流量

・バイパストンネル規模を大きくすれば、排砂量が多くなる一方で、経済面で不利となるといったトレードオフの関係を踏まえ、費用対効果が大きくなるように対象流量を設定している。

■トンネル平面形

・地形・地質の特性を踏まえて、構造的な安全性が確保可能なルート範囲を検討している。
 ・ルート範囲の中でも最短となるルート（経済的なルート）を設定している。
 ・トンネルとダム関連工作物（仮排水トンネル、カー

テングラウト工、試掘横坑)との離隔距離が短くなると、トンネル空洞部周辺の発生応力が関連工作物に変位等の影響を及ぼす可能性があることから十分な離隔を確保するものとしている。

■トンネル縦断線形

- ・掃流砂を含む、全粒径をバイパス対象とする場合、縦断勾配が緩いとトンネル内に土砂が堆積する可能性が生じるため、十分に土砂を流送するための縦断勾配として1/30～1/50程度を設定している。
- ・ウォッシュロードのみを対象とする場合には、トンネル内における土砂堆積の可能性が小さいことから、縦断勾配として1/100程度を設定している。

■分派対象土砂の粒径

- ・排砂バイパスの設置目的は、「有効容量の維持」、「下流河川への土砂供給促進」、「濁水長期化問題の改善」であり、基本的には全粒径(ウォッシュロードから掃流砂まで)をバイパス対象としている例が多い。

■分派ルール

- ・ダム貯水池への土砂流入量が増加するのは、洪水時であることから、バイパストンネルの運用は洪水時に実施している。
- ・排砂バイパスに洪水調節機能を分担させる場合には本来ダムに求められる洪水調節機能を踏まえた上で、トンネルの呑口構造を工夫することで所定の分派ルールを確保している。

②設計

■トンネル断面

- ・断面形状については、円形、馬蹄形、幌形の3タイプが同程度の割合で建設されている。
- ・設計流速については、全粒径をバイパス対象とする事例では、トンネル内での土砂堆積・閉塞に配慮し、11～20m/sに設定されている。

■分派堰

- ・分派堰(および上流に設置する貯砂ダム)は、耐久性の確保に配慮して、コンクリート構造が基本となっている。
- ・現地材料(河床材料)の入手が可能な場合には、経済性に配慮し、二重鋼矢板構造等が採用されている。

■呑口部

- ・大量の土砂がバイパスに流入した場合、呑口部周辺

で十分な流速が確保できない場合、土砂が堆積・閉塞するおそれがあることから、呑口部からトンネルへの導流区間はシュート形状を採用し、トンネル内の流速を増加させる構造としている。

■吐口部

- ・吐口部周辺の河道線形や保全対象施設の有無により減勢工の必要性や減勢工方式が判断されている。

■摩耗対策

- ・全粒径をバイパス対象とする場合には、摩耗損傷に配慮する必要があるため、50～100mm程度の摩耗代を設定している。
- ・スイスのバイパス事例では、覆工厚に摩耗代を設ける以外に、摩耗量の抑制の観点より、鋼製によるライニング、石材(玄武岩や花崗岩)によるライニング等、硬質な材料でのライニングが実施されている。また、スチールファイバーコンクリート等による方法が検討されている。

③管理

■補修方法

- ・施工性に配慮し、高強度コンクリートによる補修が基本となっている。なお、摩耗補修厚は、骨材寸法も考慮の上、設定している。
- ・スイスのバイパス事例では、摩耗損傷量が大きいため、石材ライニングや鋼製ライニングによる補修を実施している。

(2) 設計上の留意点の抽出

上述の事例分析結果に基づいて、計画・設計・管理の各観点から、排砂バイパスについての設計上の留意点を抽出した。

なお、計画論としての「トンネル対象流量」「分派対象土砂の粒径」「分派ルール」は相互に関連する項目であるため、一連のシステムとして計画する必要がある。同様に、設計論としての「トンネル断面形状」「摩耗対策」及び管理論としての「補修方法」は相互に関連するため、一連の対策として設計する必要がある。

抽出した設計上の留意点及び上述の関連性について、次頁の平面模式図(：図-4)に整理して示す。

(3) コスト構造分析

排砂バイパスは自然の営力を活用した排砂技術であり、下流河川環境への負荷が比較的少ないと考えられる手法である。

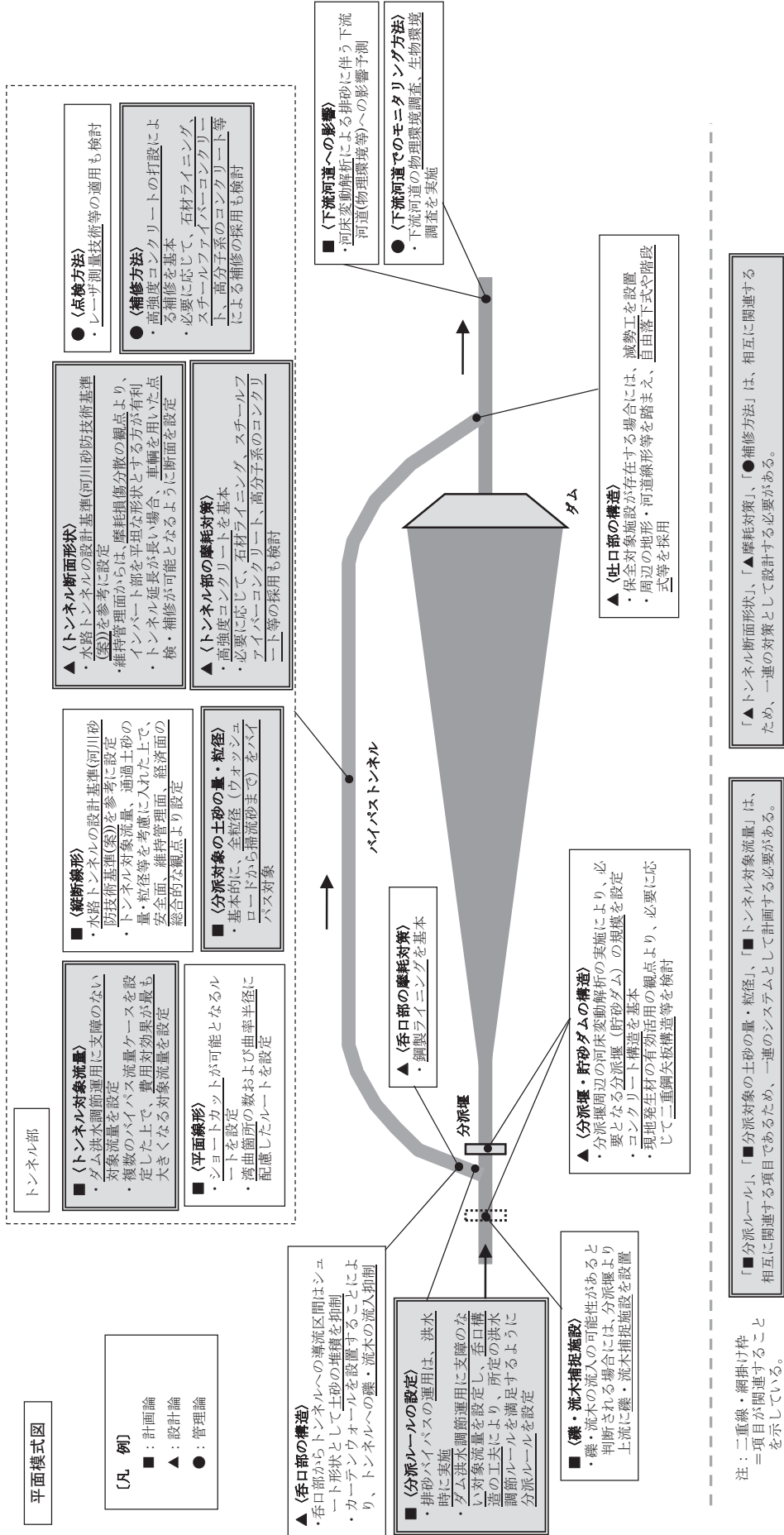


図-4 排砂バイパスの設計上の留意点の整理

しかし、一方で、トンネル等施設建設の初期投資費用及び施設の摩耗補修などの維持管理費などの施設費用がかかる。このため、排砂バイパスの配置検討・計画にあたっては、経済性がその可否を判定する上での重要な判断材料となる。

よって、バイパス施設導入・運用にかかるコスト構造を分析し、効率的なコスト縮減を図ることが重要である。

a) 工種別コスト割合の把握

排砂バイパス施設の工種を区分し、そのコスト構造を分析する。工種は、トンネル工、呑口工、吐口工、分派堰、放流設備工、管理設備に区分する。

施設規模の設定要素としては、図-5に示すように、トンネル延長を延ばす、トンネル断面を大きくする、という大きく2つの方向性が考えられる。

これらの2つの設定要素をそれぞれ変化させた場合にはコストにどのような傾向でどれくらいの割合で反映されるかを検討する。

各検討ケースにおける工種別コストを積み上げた結果を図-6に示す。

分析の結果、各検討ケースにおいて、総コストに対して占める割合が高いのは「トンネル工」(：図-6における太枠囲み部分)であり、総コストの約40～60%という結果となった。

従って、効率的なコスト縮減を図るためには、トンネル工に主眼をおいた検討を行うことが重要である。

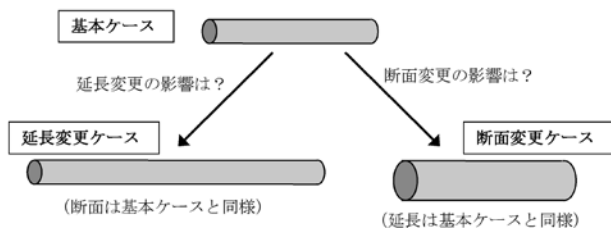


図-5 コスト構造分析における検討ケース設定の考え方

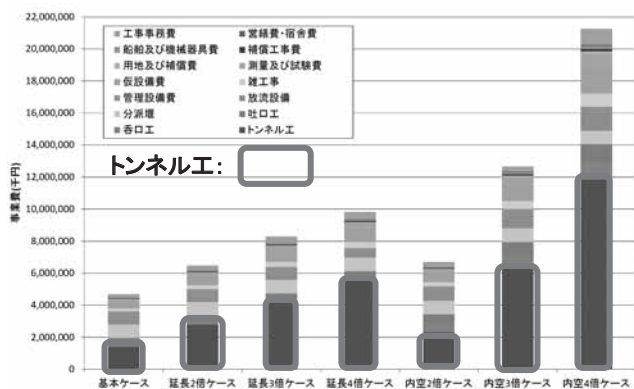


図-6 工種別コストの算定結果

b) トンネル工に着目したコスト分析

前述のとおり、排砂バイパスの事業費において支配的となるのは、トンネル工であることが明らかになった。トンネル工のコスト縮減策としては、トンネル覆工に高強度コンクリートを使用することが考えられる。

図-7に示すとおり、この方策の利点としては、①高強度コンクリート使用により摩耗代を小さく見込むことができ、掘削・施工断面積を小さくすることで初期費用を抑えることができる可能性がある、②耐摩耗性の向上により摩耗補修による維持管理費用を抑えることができる可能性がある、という2点である。

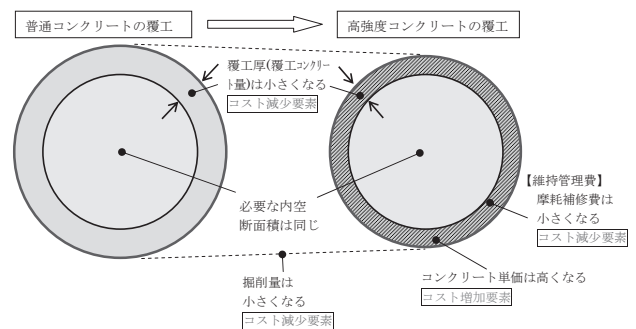


図-7 高強度コンクリート使用に伴うコスト変化の概念図

概算費用を用いた試算に基づく分析の結果、トンネル工において、覆工に高強度コンクリートを使用することによって、初期費用として約4%、維持管理費用として約20%低減できる可能性があることがわかった。

なお、摩耗量の推定は、「ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究, 石橋, 土木学会論文集 第334号・1983年6月」を参考に、摩耗計算を行った。

(4) 今後の研究について

本研究において得られた、排砂バイパスの事例分析により抽出した設計上の留意点や、コスト構造分析により得られたコスト縮減の可能性を踏まえて、実際のダムを対象としたケーススタディを実施する予定である。

このケーススタディにおいて、トンネルの平面・縦断線形、トンネル断面、分派ルール、呑口・吐口の概略構造、概算コスト等を概略検討することで、設計の体系化やさらなるコスト縮減に関する新たな課題を抽出し、体系化の整理に反映する。

ケーススタディの対象ダムは運用開始後50年程度が経過し、堆砂計画以上の速度で堆砂が進行しているようなダムを想定している。

5. まとめ

本稿では、ダム堆砂対策における有用な排砂工法の一つである排砂バイパスについて、国内外の実施事例を収集・分析し、計画論・設計論・管理論の観点から、設計上の留意点を抽出・整理した。また、コスト構造分析により、効率的なコスト縮減を図るための検討にの基本的な方向性を示した。

今後、これらの検討内容に基づいてケーススタディを実施し、より具体的な課題の抽出を行った上で、排砂バイパスの設計体系化に向けた整理を行っていく。

謝辞

本稿は、水源地環境センターが調査研究のために設けた「ダム土砂マネジメント研究会（委員長 角哲也 京都大学防災研究所教授）」で議論された研究会資料をもとに構成したものである。研究会において貴重なご助言・ご指導を頂いた委員の皆様方、また研究会資料作成にあたりデータの整理等に尽力頂いた株式会社建設技術研究所の石田裕哉氏、高田康史氏に紙面を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 財団法人 ダム水源地環境整備センター：ダムの堆砂対策技術ノート-ダム機能向上と環境改善に向けて-, 2008.
- 2) 清原正道他：ダム貯水池の計画堆砂容量に関する調査研究, 平成23年度ダム水源地環境技術研究所所報, 財団法人 ダム水源地環境整備センター, 2012.
- 3) (財)ダム技術センター：多目的ダムの建設 第7巻管理編, pp100-103,pp137-141, 2005.
- 4) 石橋毅：ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究, 土木学会論文集第334号, 土木学会, 1983.
- 5) D.L Vischer, W.H Hager, C Casanova, B Joos, P Lier, O Martini : Bypass Tunnels to Prevent Reservoir Sedimentation, 19th ICOLD Congress,Florence,Q.74., 1997.
- 6) C. Auel & R.M.Boes, : Sediment bypass tunnel design - review and outlook, Dams and Reservoirs under Changing Challenges, 2011.