

ダム再生の技術的留意点(1) ～放流能力増強・同軸嵩上げ～

佐藤弘行・矢島良紀・石神孝之

1. はじめに

ダム再生は治水・利水・環境等における流域の特性や課題に対応し、ハード・ソフトの両面から既設ダムを有効活用する取り組みであり、目的が多岐にわたるほか、その手法も多種多様である。

国土技術政策総合研究所および土木研究所では、永年にわたり堤体嵩上げや放流能力の増強などの研究開発および技術指導を実施し、その成果は「ダム再生ガイドライン」¹⁾等に反映されている。

本報文では、ダム再生のうち治水・利水機能向上のための既存施設改良に位置づけられる洪水吐きの放流能力増強と貯水容量増大を目的とした既設堤体の嵩上げについて、実施事例を重ねてきた結果から見えてきた技術的留意点について述べる。

既設堤体の嵩上げ方式には、同軸嵩上げの他、下流側に軸線をずらした下流軸嵩上げ、下流サイトへのダム新設の方式があるが、本報文では、ダム再生特有の課題や留意点が多く、事例も豊富な重力式コンクリートダムの同軸嵩上げを中心に記述する。下流軸嵩上げについては、現在、実施中の事業等での技術的な対応等を別途整理し報告を考えている。下流サイトへのダム新設については技術的には新設ダムの場合を援用できると考えられることから割愛する。

なお、ダム再生により貯水池の水位変動範囲や変動速度が変更される場合の貯水池地すべり等の斜面管理や、貯水容量維持のための堆砂対策、流木・沈木、水質保全等の貯水池管理については、「ダム再生の技術的留意点(2)」²⁾で述べる。

2. 放流能力増強の技術的留意点

治水・利水機能向上のための既存施設改良に位置づけられる洪水吐きの放流能力増強の手法については、大きくは「堤体切削」・「堤体削孔」・「トンネル洪水吐き新設」の3つの手法があり、それ

ぞれの手法について紹介する。

2.1 堤体切削によるクレスト洪水吐の増設

堤体を切削してクレスト（越流形式）放流設備を新設・増強する手法である。堤頂付近の施工であり設計水深が小さいため、高圧対応の課題は少ない。施工時に貯水位を低下させることで仮締切等の設置が不要となる場合には、比較的施工が容易となる。ほぼすべての事例で堤頂部の越流幅拡大ブロックで堤趾部減勢のために堤趾導流壁を設けている。

堤体切削による洪水吐増設では、徳島県那賀川の長安ロダム（国土交通省）が最大規模である。高さ約37m×幅約11m、高さ約28m×幅約11mの切削を行い、2つの放流設備を増設した。

貯水位を下げず貯水池運用を維持しながら切削するため、堤体に替わる予備ゲートを先行設置した後堤体を切削した。設計水位で増設放流設備から最大約4,000m³/sが既往洪水吐きの放流に合流するため、増設洪水吐き下流の導流部と減勢工の大幅な改造が必要となり、水理模型実験により形状を決定した。

2.2 堤体削孔による放流管洪水吐の増設

既設のダム堤体に穴をあけ、放流設備を増設する手法で、基本的には重力式コンクリートダムに適用される。日本では、利水目的の貯水池運用上の制約から貯水位を大きく低下させることが難しく、大水深条件での施工が求められるため、ダム堤体上流側の仮締切技術が重要となる。

堤体削孔できる穴の規模や数が対象ダムの構造により制約を受ける中、経済性の観点からはなるべく放流流速を大きくしたいところであるが、作用水頭が25mを超える放流設備は高圧放流設備と定義され、放流流れが高速となるため、局所的な負圧の発生等によるキャビテーション損傷を防止する必要から、管内流速を抑制する必要がある。さらに、増設放流設備では放流管の呑口と出口の

配置を直線上にできず、複雑に湾曲する形状となることがあるが、大口径放流管の湾曲部では局所的な圧力低下が生じやすくなることに注意を要する。なお、この点に関しては、水理模型実験による湾曲部の壁面作用圧力に関する検討によって³⁾、現在では合理的な設計が可能となっている。

堤体削孔の事例としては、鹿児島県川内川の鶴田ダム（国土交通省）にて、増設放流管3条（直径4.8m、削孔断面：高さ6.0m×幅6.0m）、付替発電管2条（直径5.2m、削孔断面：高さ6.4m×幅6.4m）を増設したものが既往最大規模である。この施工における仮締切では、ダム上流の水中に台座コンクリートを設置後、鋼製の仮締切扉体を組み上げる従来の工法の他に、台座が不要な浮体式仮締切の新技术が開発され⁴⁾、大深度潜水作業を軽減し、コスト縮減や安全性確保が実現された。

堤体放流設備は流量が小さければ、既設の減勢工を活用できるが、鶴田ダムのように大規模な場合には専用の減勢工新設が必要となる。鶴田ダムでも長安口ダム同様に水理模型実験で流況を確認しながら形状が決定された。

なお、作用水頭が25m以下のオリフィス形式の放流設備増設のうち、堤頂に近い場所にオリフィスを設ける場合には堤体を上部から開削する施工方法が用いられる。

2.3 トンネル洪水吐きの新設

2.1や2.2の手法を用いることがダム構造上の制約から困難な場合は、ダム堤体周囲の地山内にトンネル洪水吐きを新設する。愛媛県肱川の鹿野川ダム（国土交通省）と京都府淀川为天ヶ瀬ダム（国土交通省）の2つの事例がある。

鹿野川ダムのトンネル洪水吐きはトンネル直径11.5m・延長457m・放流量約1,000m³/s、天ヶ瀬ダムのトンネル洪水吐は直径10.3m・延長617m・放流量約600m³/sである。どちらも作用水深が25mを超える高圧放流設備となるため、トンネル水路断面を大きくし流速を10m/s程度に抑える設計とした。流入部水深が小さい管路流は流入部からの空気吸込みにより出口ゲートの振動や流況の乱れを招く懸念がある。空気混入が生じない流入部水深とする配置が困難だったため、水理模型実験を行い吸い込み渦の発生を抑える流入部形状とした。

天ヶ瀬ダムの貯水池内流入部施設の施工では、

民間企業開発の陸上から遠隔操作で水中掘削等の作業が行えるシャフト式水中作業機⁵⁾が採用された。

両ダムとも放流量が大きく、減勢工が必要になるが、河道内の配置に制約があり、鹿野川ダムでは段差やバップルピアを配置することでコンパクトな減勢池形状とし、天ヶ瀬ダムでは地山内に減勢工を設置する工夫がされている。両ダムの減勢工は水理模型実験により減勢効果を確認しながら形状を決定した。

2.4 放流能力増強の適用範囲

2.1～2.3に述べた3つの手法について、実績等から整理される適用範囲を図-1に示す。図-1は、横軸に放流量増大量範囲、縦軸に設置可能水深範囲をとった。なお、堤体削孔放流管新設は、高圧設計が必要なコンジット放流設備と高圧設計が不要なオリフィス放流設備に細分した。

堤体切削によるクレスト放流設備新設は、切削高さの施工等限界から設置可能水深範囲に限界がある一方で、実績からは放流量増大量範囲は最も大きい。

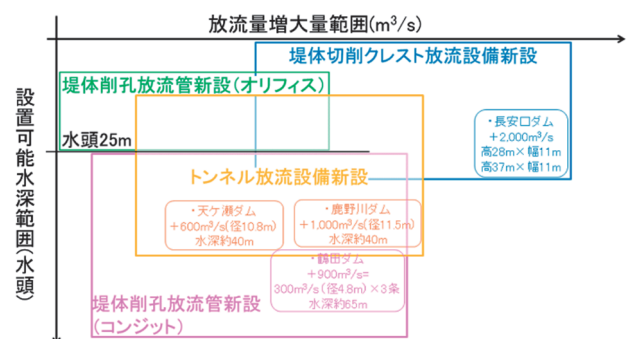


図-1 放流能力増強手法の適用範囲（実績）

ただし、クレスト放流設備の新設が可能なブロック数や減勢施設の設置可能スペースがもう一方の制約となるため、ダム毎に限界増強能力の検討・確認が必要である。

堤体削孔による放流管増設とトンネル放流設備新設では、設置可能水深範囲が拡大する。堤体削孔は構造等の制約で1条の放流管径は4.8mが最大で、放流量増大量を大きくするには条数増加が必要となるが、物理的に配置可能条数の限界がある。

トンネル放流設備は、管径・配置の制約は堤体削孔に比べ小さいが、延長が長くコスト上の負荷が大きい。能力増大量の実績最大は約1,000m³/sで、堤体切削の最大2,000m³/sには及ばない。

なお、既設堤体の切削や削孔に際しては、既設堤体の健全性とともに関与堤体安定性への影響について基礎地盤の評価を含めた確認、トンネル放流設備の新設では十分な地山の地質調査が必要になる。

3. 同軸嵩上げの技術的留意点

3.1 堤体嵩上げの方式

重力式コンクリートダムのか上げは、①既設ダム軸に新堤体軸を一致させた同軸嵩上げ、②下流側に軸線をずらした下流軸嵩上げ、③下流サイトへのダム新設、の3つの方式がある（図-2）。

ダムサイトの地形・地質条件、既設堤体の構造や健全性、嵩上げによる堤体安定性への影響、施工中の運用水位条件や洪水処理方法を含めた貯水池運用、関連設備への影響等を総合的に勘案して適切な嵩上げ手法が選定される。

同軸嵩上げで、貯水容量増大を目的とした堤体の嵩上げ工事が完了している例を表-1に示す。

同軸嵩上げ等の堤体改造を伴うダム再生の堤体の設計は、新設ダムと同様に河川管理施設等構造令⁶⁾等の規定を満たす必要があるとともに、既設

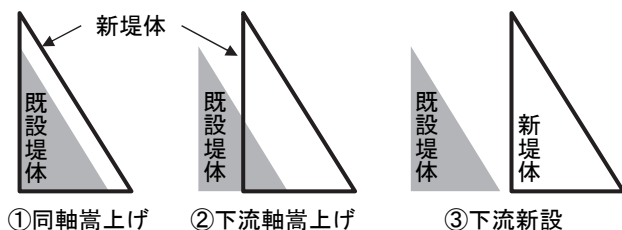


図-2 重力式コンクリートダムの嵩上げ手法

表-1 重力式コンクリートダムの同軸嵩上げ事例

ダム名	堤高(m)		堤高の増加割合	有効貯水容量の増加割合
	既設ダム	嵩上げ後		
王泊	63.5	74	1.17	約2
三川	48	53	1.10	不明
川上	46.5	63	1.35	2.30
黒田	35	45.2	1.29	約2
新中野	53	74.9	1.41	4.70
曲淵	37.3	45	1.21	1.67
萱瀬	51	66.5	1.30	2.26
三高	32.6	44	1.35	2.54
下の原	30.6	36.5	1.19	1.65
氷川	56.5	58.5	1.04	1.16
笠堀	74.5	78.5	1.05	1.14
新桂沢	63.6	75.5	1.19	1.67

堤体コンクリートの上に新たにコンクリートを打設する等のダム再生に特有な条件により発生する技術的な課題にも留意する必要がある。既往のダム再生事例を踏まえた設計・施工における主な技

術的な留意点はダム再生ガイドライン¹⁾にその要点が整理されている。

3.2. 同軸嵩上げにおける技術的留意点

ダムは基礎岩盤と一体で水圧を支える構造物であり、堤体とともにその基礎地盤の安定性についても十分な検討が必要である。そのため、新設ダムでは第四紀断層調査を含む入念な地質調査を実施した上で基礎地盤の評価を行い、それを踏まえた設計及び施工計画の作成が実施されている。

堤体嵩上げでも、基本的な流れは新設ダムと同様であるが、既設堤体や貯水池が存在するため、新設ダムと異なる課題も存在する。以下に、ダム再生、特に同軸嵩上げで実施される調査・設計・施工に関する技術的な留意点について記載する。ただし、前述のとおり放流設備増強に際しても地質調査や岩盤評価が必要になる場合があるため、地質に関してはダム再生の種類を問わず、共通する課題や留意点について記載する。なお、貯水池周辺斜面の地質調査や安定度評価については、「ダム再生の技術的留意点(2)」²⁾に述べる。

3.2.1 第四紀断層調査

第四紀断層は地下浅部で発生する内陸型地震の要因とされ、その活動によっては地震動に加えて地表変位をもたらすこともある。そのため、国土交通省が所管する既設ダムでは基本的に建設段階までに文献調査、地形調査および必要に応じて行われる地質調査に基づく第四紀断層調査を行い、ダムの安全性を確認している。ダム再生ガイドライン¹⁾では「ダム再生事業を実施する場合の第四紀断層調査は、既往の調査結果を踏まえつつ、最新の文献等によって、ダムの安全性に影響を与えるような要注意な第四紀断層が存在しないことを確認することが基本となる」としている。また、トンネル洪水吐きの新設にあたっては、堤体だけでなく、トンネル部も含めて検討する必要がある。

3.2.2 基礎岩盤および既設堤体の物性等の把握

ダム再生の実施にあたり、必要な情報として、既設堤体コンクリートの強度物性や既設堤体下の地質や透水性、岩盤強度、それらを踏まえた設計の考え方、施工方法など、既設ダム建設時の調査・設計・施工に関する資料の確認が必要である。しかし、竣工年代の古いダムではダム再生に必要な情報が十分に残されていない場合や、調査や設計の考え方が現在とは異なる場合もあり、その場

合にはボーリング調査等による新たな地質調査やそれに基づく岩盤評価、既設堤体の健全性の調査等が必要になる。これにより、同軸嵩上げが可能か判断し、計画する場合にはそれらの情報を踏まえて嵩上げダム設計を行う必要がある。

3.2.3 ダムサイト地質調査

ダム再生では、既設堤体と貯水池の存在を前提にした地質調査の計画を立案する必要がある。露頭の確認が困難なことに加え、ボーリング調査が可能な範囲もダムの天端や監査廊、堤趾部付近などに限定されるほか、トンネル洪水吐きでは、呑口部が貯水池内となるなどの制約もあり、新設ダムと比較すると調査範囲や数量が限定的にならざるを得ない。そこで、通常の鉛直ボーリングに加え、斜め方向へのボーリング調査が実施されることも多い(図-3)。また、ボーリング調査で把握できない範囲の地質情報を補間するため、施工時に撮影された掘削面写真と露頭、ボーリングコアを比較分析し、写真から地質や岩盤性状を推定する取り組みも行われている⁷⁾。

横坑調査は地山内部の地質性状を直接観察できるほか、岩盤の原位置せん断試験が可能なため、地質調査として非常に有効であるが、ダム再生では現地条件から掘削が困難な場合がほとんどである。しかし、嵩上げ規模が大きい場合などでは行われることもあり、その際には、既設堤体や止水範囲に影響を与えないようにレイアウトや掘削方法に留意する必要がある。同軸嵩上げダムで調査横坑の掘削や原位置せん断試験を実施した事例では、北海道開発局の新桂沢ダムや山口県の川上ダムなどがある。

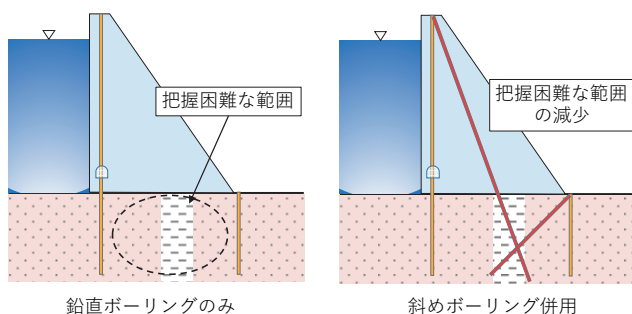


図-3 斜めボーリングの活用イメージ

3.2.4 岩盤評価

堤体嵩上げや放流設備増強などにより堤体の自重や最高水位が変化する場合には、基礎岩盤に必要なせん断強度が変わるため、岩盤の設計せん断

強度の確認と再生後の堤体の安定性評価が必要となる。しかし、前述のように、既設ダムの岩盤分類や設計せん断強度の情報がそのまま利用できない場合も多く、その場合には新設ダムと同様の考え方で新たに岩盤の評価が行われている。

現在、国土交通省の所管するダムでは、岩盤を硬さ、亀裂間隔、亀裂の状態の三要素で区分し、その組合せで岩級を評価する土研式岩盤分類が一般的であるが、再生対象ダムでは定性的な記述による区分や、そもそも区分がされていない事例もあり、その場合には、地質調査結果をもとに新たに土研式岩盤分類に基づく岩級評価が行われる。

各岩級の設計せん断強度の設定にあたっては、ダム再生では原位置せん断試験が実施できないことが多いため、地質や岩盤性状の類似するダムの試験値を参考に設定することが一般的に行われる。このとき類似するダムの選定が極めて重要であり、設計せん断強度の設定にあたっては、危険側の評価とならないように、複数の類似ダムのデータを用いた検討を行うことや、統計的な手法に基づく整理結果⁸⁾を用いて妥当性の確認を行う必要がある。

3.2.5 ダム再生における地質調査・評価の重要性

既設堤体下の岩盤は、嵩上げダムの設計等に必要調査ボーリングを除き、事業実施にあたり基本的に掘削によって確認されることはないため、新設ダムと異なり、調査設計時の評価が見直されることなく、施工、管理の段階に移行することになる。そのため、ダム再生にあたっては新設ダムと同様に地質の不均質性や調査結果の不確実性を考慮し、必要な調査を確実に実施することが必要である。

3.2.6 基礎掘削

基礎地盤の地質調査等の結果から、同軸嵩上げを行う基礎地盤が必要な強度を有しているか確認を行うとともに、嵩上げダムが新たに上座する部分の基礎地盤については、新設ダムと同様に基礎掘削を行って必要な強度が得られる岩盤を露出させる必要がある。基礎地盤の掘削においては、発生する振動等により既設ダムの堤体や基礎地盤への影響を最小限にとどめるため、極力振動が発生しない工法を選択し、既設堤体等において振動のモニタリングを行ってその影響を評価することが望ましい。

3.2.7 基礎処理

嵩上げにより運用水位が上昇することから、嵩上げ後の貯水位に対して基礎地盤が必要な遮水性等の性能を有しているか確認を行い、必要に応じてグラウチング等による基礎処理を行う必要がある。前述のとおり、既設ダムของ竣工年代が古い場合には既設ダムの基礎地盤の透水性や基礎処理の詳細が不明な場合が多い。このため、基礎地盤の透水性等をボーリング調査により評価したうえで、嵩上げに伴う基礎処理工の追加や補強の必要性を検討する。なお、嵩上げに伴い新たにダム基礎となる左右岸端部は新たに基礎処理工が必要となる。

3.2.8 堤体の基本断面形状

新設ダムでは河川管理施設等構造令⁶⁾に示される構造計算法（震度法）を用いてダムの堤体が滑動や転倒に対して安定なものとなるよう基本断面設計を行う。同軸嵩上げの場合には、既設堤体の荷重状態に嵩上げとそれに伴う運用水位の上昇によって新たに加わる荷重が作用する等の嵩上げ特有の荷重条件の変化を考慮した上で、嵩上げ後の堤体が滑動や転倒に対して安定となるよう基本断面を決定する必要がある。この検討には、嵩上げダムの基本断面形状の検討に從來から用いられてきた垣谷による方法⁹⁾あるいはその改良法として嵩上げに伴うより実際的な荷重条件変化を考慮する安定計算法を用いることができる¹⁰⁾。また、新旧堤体の接合部付近に発生する応力を詳細に評価することなどを目的として、FEMによる応力解析を行い、局所的に発生する応力が堤体の安定性に及ぼす影響についても評価することが望ましい場合もある。

3.2.9 堤体の止水機能の確保

堤体の止水機能を確保するために、堤体に設けられている横継目には止水板が設置されるが、竣工年代が古い場合には既設堤体の止水板の配置等の詳細が不明な場合がある。そのため、既設堤体の止水板の配置等を調査した上で、既設堤体と嵩上げ堤体の止水板が確実に接続するよう設計することにより、堤体の水密性を確保する必要がある。

3.2.10 温度応力への対応

重力式コンクリートダムの同軸嵩上げでは、既設堤体に拘束される嵩上げ部分（増厚部）の堤体コンクリートに温度応力による有害なひび割れが生じないよう留意する必要がある。特に、嵩上げ

部分の高さが比較的lowく、増厚部のコンクリートの厚さが薄い場合には、既設堤体の拘束による影響が大きくなり、嵩上げダムの下流面の表面に温度応力が原因と推定されるひび割れが発生した例がある¹¹⁾。このような温度ひび割れは一般的に下流面の表面に発生するためダムの安全性にただちに影響を与えるものではないが、ひび割れの発生を抑制するため、実際の施工時に近い打設工程や気温変化を用いた温度応力解析を行い、温度応力解析から算定される引張ひずみあるいはひび割れ指数が許容値内に収まるよう適切な温度規制計画を策定する。なお、許容値の設定は、実際の嵩上げに使用されるコンクリートを用いて引張強度試験を行い、その結果をもとに行うことが望ましい。

3.2.11 新旧堤体の一体化

同軸嵩上げでは、前述のように嵩上げダムの堤体に有害な温度ひび割れが発生しないようにするとともに、新旧堤体が確実に一体化するよう施工を行う必要がある。



図-4 新桂沢ダムの既設堤体下流面のチッピング¹²⁾

新桂沢ダムでは、既設堤体の下流面の表面を厚さ3cm程度チッピングすることにより（図-4）、表層の劣化した部分の除去を行うとともに、既設堤体の表面を粗面にすることで新旧コンクリートの付着性を高めている。また、チッピング後の既設堤体表面にモルタルを1.5cm程度の厚さに塗布してから嵩上げ部の新コンクリートを打設することにより、新旧堤体の一体化が図られている¹²⁾。

3.2.12 洪水吐減勢工の設計と施工中の機能維持

水理設計上は嵩上げ後の放流設備配置が重要になる。貯水位が高くなり、放流量の増加だけでなく放流水の流速も大きくなるため、減勢工などの規模を大きくする必要が生じる場合が多い。

既存の設備を一部利用する場合には放流水の処理に工夫が必要になるが、配置上の制約が少なけ

れば新規ダム設計の知見を用いることができる。

新設ダムと異なり、既設ダムの機能を確保しながらの施工が求められる場合が多く、施工中の洪水処理方法や転流方法が重要になる。必要に応じて水理模型実験を行い、施工中の流況を確認して適切な施工手順を検討する。

3.3 試験湛水

同軸嵩上げによるダム再生は運用水位の上昇を伴うため、嵩上げダムとしての運用開始にあたっては基本的に試験湛水を行い、ダムとその基礎地盤及び貯水池周辺斜面の安全確認を行う必要がある。なお、嵩上げでなくとも、再生後において既設ダムによる貯水位運用の条件（水位変動幅、水位変動速度）を超える運用を行う場合には、試験湛水による安全確認を実施することが基本となる。

一方、貯水位運用を変更しても、既設ダムの運用でダム再生事業後のダム堤体とその基礎地盤および貯水池周辺斜面の安定性が確認されていると判断される場合には、必ずしもダム新設と同様の試験湛水を実施する必要はないが⁶⁾が、試験湛水の実施の必要性判断、また試験湛水が必要と判断される場合にはその実施条件の設定の根拠とするため、貯水位変動の実績や計測データ等から既設ダムでの堤体、基礎地盤および貯水池周辺斜面の安定性を確認しておく必要がある。

4. まとめ

本報文ではダム再生のうち、治水・利水機能向上のための既存施設改良に位置づけられる洪水吐きの放流能力増強（堤体切削・堤体削孔・トンネル洪水吐き新設）と重力式コンクリートダムの同軸嵩上げについて、その技術的特徴や留意点について述べた。

本報文では現時点で重要と考えられる事項に絞って紹介しているが、ダム再生には多くの手法

があり、また対象となる既設ダムの構造やそれを支える岩盤も竣工年代や現地条件等により様々である。そのため、ダム再生にあたっては、ガイドラインを参考としつつ、個々のダムの条件や特徴を踏まえた設計及び施工方法を検討することが肝要である。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局 河川環境課流水管理室、治水課事業監理室：ダム再生ガイドライン、25p、2018。
- 2) 梶山敦司、石神孝之、高田翔也：ダム再生の技術的留意点(2)～貯水池斜面管理、堆砂、流木・沈木、水質～、土木技術資料、第64巻、第2号、pp.16～21、2022
- 3) 柏井条介、宮脇千晴：円形放流管湾曲部の圧力特性、ダム工学、Vol.9、No.4、pp.245～252、1999
- 4) 加治賢祐、川元壊二、山田信一郎：鶴田ダム再開発事業における浮体式上流仮締切、ダム技術、No.339、pp.62～65、2014年12月
- 5) 谷地宜之、蒲谷大輔、八重田義博、上山淳：T-iROBO UW（シャフト式遠隔操縦水中作業機）について、土木学会第70 回年次学術概要集、VI-723、pp.1445～1446、2015 年
- 6) 国土開発技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令、2000。
- 7) 菅野裕也、長田仁、谷口清、尾関敏久：新桂沢ダム（同軸嵩上げ）における地質解析―再開発ダムにおける地質構造・岩級分布の推定―、ダム技術、No.338、pp.50～64、2014
- 8) 森良樹、脇坂安彦、佐々木靖人、阿南修司：原位置岩盤せん断試験によるダム基礎の岩盤分類の定量的な評価の試み、ダム工学、Vol.17、No.3、pp.202～215、2007
- 9) 垣谷正道：嵩上げ堰堤の安定計算について、日本放送電工、第1202号、1946。
- 10) 榎村康史、金銅将史、佐藤弘行、小堀俊秀：ダム堤体嵩上げに関する技術的課題、土木技術資料、56-2、pp.6～9、2014。
- 11) 一般財団法人日本ダム協会：コンクリートダムの温度ひび割れの現状と対応、124p、2018
- 12) 三上達也：同軸嵩上げによるダム再生-新桂沢ダム堤体建設工事-、ダム日本、No.891、pp.23～29、2019

佐藤弘行



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室 主任研究官
SATO Hiroyuki

矢島良紀



土木研究所地質・地盤研究グループ地質チーム 主任研究員
YAJIMA Yoshinori

石神孝之



土木研究所水工研究グループ水理チーム 上席研究員
ISHIGAMI Takayuki