

# 山間遊水池としての洪水調節専用（流水型） ダムの高機能化に関する研究

小松利光<sup>1</sup>・池田駿介<sup>2</sup>・清水康行<sup>3</sup>・渡邊康玄<sup>4</sup>・角哲也<sup>5</sup>・  
鈴木英一<sup>3</sup>・木村一郎<sup>3</sup>・池田隆<sup>6</sup>・押川英夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院工学研究院 環境社会部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

<sup>2</sup>株式会社建設技術研究所 池田研究室 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

<sup>3</sup>北海道大学 大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>4</sup>北見工業大学 工学部 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

<sup>5</sup>京都大学 防災研究所 水資源環境研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>6</sup>財団法人ダム技術センター ダム技術研究所 (〒110-0008 東京都台東区池之端2-9-7  
池之端日殖ビル 2F)

近年注目を集めている流水型ダム（穴あきダム）は山間遊水池とみなすこともできるため、河川外にスペースを要しないこともあって、今後その必要性は益々増加してくるものと思われる。本研究グループでは、計画・設計・管理の観点から流水型ダムのさらなる高機能化を目指して研究開発を実施した。計画では他のダム形式と比較した場合の流水型ダムの経済性と、越流を許容する新たな治水方式の洪水制御能力の検討、設計論では魚類が通過しやすい構造の開発、管理では土砂や栄養塩類への影響などに着目し、環境へのインパクトがより少なく、かつ経済的・水理的観点などから高機能な流水型ダムへの展開について検討した。

キーワード 流水型ダム, 山間遊水池, 洪水制御, 潜り跳水式減勢工, カスケード方式

## 1. はじめに

山間遊水池とみなすこともできる近年注目を集めている流水型ダムは、過去に類似の事例が少ない河川構造物である。未知の部分が多い故、その機能が十分かつ継続的に発揮されるためには、計画・設計・運用の各段階において、治水・利水・環境などの多方面にわたる十全な検討が要求される。そのため、水理模型実験、数値解析モデルによる検討、既存ダムの調査などを適切に組み合わせる必要があることから、本研究では6機関（9名）におよぶ研究グループを構築して適切な分業体制を敷くことで、高機能な流水型ダムの実用化を目指して研究開発を進めてきた。例えば、数値解析モデルは、その経済性、柔軟性、迅速性において圧倒的に優位な手法であり、想定される様々な条件を検討する上で適している。そこで本研究では、流水型ダムの水理、堆砂、環境などに関する信頼性の高い数値解析モデルの構築を行った。単一のモデルを提示するのではなく、目的や要求される精度に応じて使い分けられるように、複数のモデルの組み合わせからなるシステムの構築を目的とした。また、昨今の日本および世界の経済不況やダム建設に代

表される大型公共事業への逆風などを鑑みると、事業に対する経済性の適切な評価は実用化を考える上で必須となる。そこで、流水型ダムの維持管理策定手法、計画策定における全体事業費などのコスト・ベネフィットに関する分析を併せて実施した。

## 2. 水理計算モデルの開発

流水型ダム周辺の物理現象に関する諸特性を再現するための数値解析モデルを新たに開発し、基本的水理特性、土砂移動特性の再現計算を実施するとともに、現地調査結果と数値解析結果の比較を通じて流水型ダム特有の物理現象について、そのメカニズムの解明を試みた。

流水型ダム周辺の物理現象は複雑であり、単一のモデルによるアプローチには限界がある。そこで、流れの基本構造と土砂輸送特性を再現する一次元モデルと、ダム堤体周辺の詳細な水理特性を再現する三次元モデルの二種類のモデルを構築した。先駆的な流水型ダムの一つである島根県の益田川ダムと同等のスケールを対象に、これらの数値解析モデルを用いて再現計算を実施すること

で、治水効果と流砂輸送特性に関する検討を行った。得られた主要な成果を数値解析モデル毎にまとめると以下の通りである。

#### (1) 一次元非定常計算モデルにおける計算結果

益田川ダムのスケールで洪水計算を行った結果、ピーク流量を約 1/3 に抑制する効果が示され、流水型ダムが十分な治水効果を有することが確認された。また、限界掃流力の時間的変化から、最大移動粒径の空間分布を求めた結果、堤体からの距離が大きくなるほど移動限界粒径は大きくなる傾向が示され、益田川ダムの河床材料に関する現地調査結果と良好に一致した。更に、益田川ダム上流に観察される礫溜まりの形成プロセスを数値解析結果から説明できた。

#### (2) 三次元計算モデルにおける結果

密度関数法と非線形乱流モデルを組み込んだ三次元数値解析モデルにより、流水型ダムの洪水抑制効果や、クレストゲートからの越流現象を適切に再現できることが確認された。ダム上流側の流砂輸送特性の時間的変化については、一次元解析結果とある程度一致する結果となった。なお、越流発生時には、ダム堤体背面に渦が形成される可能性が示唆された。この渦は底面付近の流れを変化させる可能性が指摘されたため、今後さらに詳細な検討を要する。

### 3. 流水型ダムの潜り跳水式減勢工の開発

流水型ダムの最大の特徴は、通常洪水吐きを通じて流砂および生態系の連続性、特に魚類の遡上・降下の連続性を図ることができることである。そのためには、洪水吐き部とともに減勢工部のバリアを極力軽減することが重要である。しかしながら、先行事例である「益田川ダム」では通常の副ダムを有する水平水叩き跳水式減勢工が採用され、後続の複数のダムでもほぼ同様な設計が行われようとしている。副ダムは水面上に突出した構造となっている。平常時の流水を流し、土砂を排出するために設置されるスリット部は流れの加速が予想されるためにどうしても人工的な流れとなり、生物の移動にとってバリアとなるばかりか、景観的にも違和感が残るデザインとなってしまう。そこで本研究では、減勢工全体の標高を下げることで自然な流れに近づける「潜り跳水式減勢工」の可能性とその基本的特性を明らかにすることを目的とした。

減勢工の設計条件は、対象となる貯水池の最高水位とそれによって決定される洪水吐き放流量およびフルード数である。一方、設計パラメータは、洪水吐き幅と減勢工幅の比、掘り込み深さ、減勢工長さ、減勢工下流のエンドシル高さなどである。これに、洪水吐きの条数の効果、洪水吐きから排出されて掘り込み部に堆積する土砂

の厚さと粒径の効果などが重要となる。

本研究では、幅50cmの二次元水路に中央1条の放流管型の洪水吐き（幅10cm、高さ7cm）を設置し、土砂の流入しない「清水条件」で、上流の貯水槽の水位を変化させながら、掘り込み深さ、減勢工長さ、減勢工下流のエンドシル高さを変化させた場合の減勢効果を検証した。その結果、掘り込みを有する場合においても、十分な減勢効果の確保には適当な高さのエンドシルが必要であること、洪水吐きが中央1条の場合には、エンドシルは全幅必要ではなく、両サイドに幅広のスリットを有する構造でも同等な効果が確保されることを確認した。さらに、掘り込み部に砂利を敷き詰めた実験により、最大洗掘深はエンドシル全面で発生すること、両サイドや上流端部分はほとんど洗掘されないことから、減勢工建設時の掘り込み形状の合理化の可能性があることを明らかにした。

### 4. 流水型ダムの土砂移動・堆積特性の把握

流水型ダムは、一般的な既存のダムと異なり常時水を貯めず、ダム堤体下端に設けられた放流口の大きさと貯水位に見合った流量のみ放流して残りを貯水する。貯水された水は、ダム流入から時間差をもってすべて放流される。したがって、貯水池内の水環境へのインパクトや土砂の堆積が少ないと一般的には言われている。しかしながら、ダム周辺での土砂の移動・堆積は明確になっていない。そこで、流水型ダムの開口形状や土砂に関する維持管理手法を確立するとともに、土砂輸送機構を解明することを目的として、平面2次元の水理模型実験を行った。

また、流水型ダムと類似の運用形態をとる北海道地区の農業用ダムを対象に、その堆砂の現状を調査することにより、流水型ダムの堆砂・排砂特性を検討する上で有用となる基礎資料を得ることを目的とした。

#### (1) 土砂移動・堆積特性に関する実験の概要

実験では、水路長 12m、水路幅 0.3m の直線水路に、混合硅砂を高さ 10cm で勾配 1/50 で均一に敷き詰めたものを初期河床とした。流水型ダム模型（開口部 2×2.5cm）は、実験水路の上流から 11m の地点に設置し、ダム上流は移動床、ダム下流は固定床とした。ダム形状および河床勾配は、河川上流域を想定し、フルードの相似則および流砂の相似則を考慮して実際に存在し得る形状とした。

#### (2) 土砂移動・堆積特性に関する実験条件

流水型ダムの特徴である洪水初期の貯水と洪水後期の排水時における土砂輸送量を明確に把握するため、洪水

時を再現した流量 ( $Q=270.0\text{cm}^3/\text{s}$ ) を定流状態で通水したもの (Case1) と平水時流量 ( $Q=102.0\text{cm}^3/\text{s}$ ) を通水した後、Case1 での洪水時流量 ( $Q=270.0\text{cm}^3/\text{s}$ ) を最大流量とした洪水波形を7度通水したもの (Case2) を流入量の条件とした (図-1 参照)。その際、両ケースともに上流端で河床高が平衡状態となるように初期河床と同じ粒径分布の砂を通水中供給した。

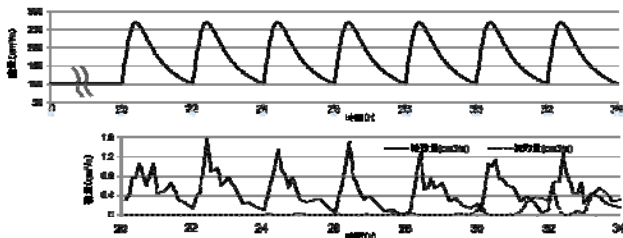


図-1 Case2 の流量波形と給砂量・排砂量の時系列変化

### (3) 土砂移動・堆積特性に関する実験結果

Case1において、土砂の堆積肩がダム直上流に到達後、中流部に形成された交互砂州の移動に伴うダム直上流部での蛇行流の時間的な左右岸への移動により、ダムからの排砂量が大きく変動した。ハイドロ形状で流量を通水したCase2では、増水期に上流部に堆積した土砂が洪水減水期に水みちを明確に形成しながら下流部に土砂を運搬堆積させた。また、5回目のハイドロ通水後の堆砂肩がダム直上流まで到達して以降の排砂量は、増水期に比べ減水期に多い結果を得た。

### (4) 現地調査の結果

北海道の農業用ダムは、融雪水を貯留して春季から夏季にかけて水田に用水を補給するが、冬季はダム施設の凍結に依る被災を避けるために完全に落水する。したがって、流水型ダムと類似の運用方法といえ、通年で貯水する治水目的をもつ多目的ダムとは、ダム湖内の土砂堆積傾向が異なると考えられる。石狩川水系の青山ダム、新十津川ダム、尾白利加ダム、恵袋別ダムの落水後の調

査を行った結果、ダム湖底一面に粒度の細かいシルト～粘土が堆積し、堆積土のリン成分は $0.33\sim 0.57\text{mg/l}$ であることが判明した。また、年平均の比堆砂量は、 $0.1\sim 0.3\text{km}^3/\text{km}^2/\text{年}$ であることがわかった。これらのデータは、流水型ダムの運用を行う上で参考にするべき値と考えられる。

## 5. 自然環境変化予測モデルの開発と適用

流水型ダム周辺の流れは、平常時は河川、洪水調節時は貯水池と同様の状況を呈する。そのため、土砂や栄養塩の捕捉は通常の貯留型ダムに比べて小さいが、河川に比べれば大きいものと考えられる。流水型ダムにおける栄養塩の捕捉状況が報告された事例はなく、それが下流に及ぼす影響も定かではない。そこで、本研究では流水型ダムにおける栄養塩の捕捉状況を現地調査および数値シミュレーションによって検討した。

まず、岩手県のレン滝ダム (流水型ダム) を対象に現地調査を実施し、湛水域の堆積土砂の粒度分布とリン含有量を分析した。その結果、低水路に堆積した土砂は  $D_{60}=200\sim 300\ \mu\text{m}$  程度、河岸段丘上に堆積した土砂は  $D_{60}=50\ \mu\text{m}$  程度であった。リン含有量は粒径 $0.25\text{mm}$ 未満では $0.7(\text{mg/g dry})$ 程度と高く、それ以上の粒径では $0.4(\text{mg/g dry})$ であった。次に、リン含有量の多い微細な土砂と、リン含有量の少ない土砂の動きに注目し、リンの挙動特性を数値シミュレーションにより検討した。数値モデルには、戸田ら<sup>1)</sup>が多摩川で出水時の栄養塩挙動を良好に再現した一般座標系平面二次元栄養塩輸送モデルを用いた。対象出水は、レン滝ダムで平成19年9月7日～8日に生じた出水とした。リン含有量の少ない土砂 (代表粒径 $0.5\text{mm}$ ) とそれ以外 (代表粒径 $0.05\text{mm}$ ) の2種類が存在比率1:1で流入すると仮定し、それぞれの挙動の特徴を検討した。その結果、前者は出水初期から湛水域上流で速やかに堆積し、出水後期に下流側へ移動す

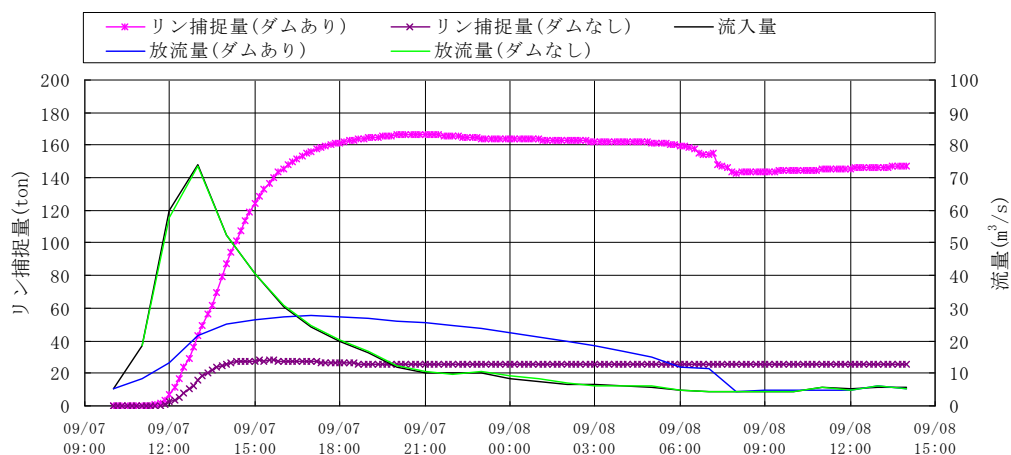


図-2 ダムの有無によるリン捕捉量の比較

様子が見られた。後者は貯水位上昇時に河岸段丘上にまで広く堆積し、出水後期においても段丘上に堆積したリンは流出せずに取り残される様子が見られた。最後に、同じ数値シミュレーションモデルを用い、流水型ダムとの存在の湛水域内へのリンの捕捉への影響を検討した。ダム堤体がない地形条件を仮定し、ダムあり・ダムなしで湛水域内のリンの捕捉量を比較した。その結果、ダムありの方がダムなしに比べ、6倍近くのリンが捕捉される結果となった(図-2参照)。これより、通常の多目的ダムと比較して上下流の連続性を維持できると期待される流水型ダムにおいても、ダムの存在によって湛水域内に栄養塩が捕捉されることにより、下流河川への栄養塩供給は減少しているものと考えられる。

## 6. 流水型ダムのコスト・ベネフィットについて

国内の流水型ダムとして、益田川ダム(島根県)、西之谷ダム(鹿児島県:建設中)などがあるが、いずれも重力式コンクリートダムである。米国やオーストリアでは、流水型ダムの放流設備が河床部に設置されるという特徴を活かしてフィルダムや複合ダムの形式を採用している事例が見受けられる。また、わが国では台形CSGダムという経済性に優れた新しい形式のダムが建設されている。本調査研究では、様々なダム形式について流水型ダムの概略設計を行うとともに、それぞれのダム形式のコストの試算並びに分析を行った。更に、流水型ダムの特徴を踏まえた、より合理的な用地取得の方法について検討を行った。

対象流量として流域面積 $20\text{km}^2$ 、治水安全度 $1/50$ 、地形条件として急峻な地形の山ダムと比較的なだらかな里ダムという条件を設定し、様々な堤体形式において流水型ダムのコスト分析を行った。その結果、以下のことが確認された。

山ダムの経済性については、重力式コンクリートダムが最も経済的であること、また台形CSGダムと中央コア形ロックフィルダムの転流工転用タイプの経済性の差は小さいこと、更にフィルダムが最も経済性が低いことが明らかとなった。

里ダムの経済性については、重力式コンクリートダム、台形CSGダム、複合型ダムが最も経済的であるとともに、転流工転用やロックフィルダムはほぼ同じ経済性であることが分かった。また、セパレートウォールを持つロックフィルダムやアースフィルダムが最も経済性が低いことが判明した。

諸外国の流水型ダムや日本の遊水池の用地買収・補償の事例を調査し、流水型ダムの貯水池の用地買収・補償のあり方について検討を行った。貯水池の用地が下記の条件を満たす場合であれば、地役権を設定し、地元で管

理を行わせることが可能と考えられる。

- (1) 地役権の設定により用地補償費の縮減が可能となる。
- (2) 冠水頻度が小さくなく、耕作や公園としての利用可能性がある。
- (3) 占用させることにより、貯水池の管理費の縮減が可能となる。
- (4) 地元の理解が得られやすい場所である(もともと冠水しやすい等)。

今後は、建設事業のみならず維持管理費等も検討し、流水型ダムでのより良い用地買収・補償のあり方について検討が必要である。

## 7. 流水型ダム群の洪水制御能力の評価

近年、公共事業費の削減や環境への影響からダム建設に代表される大規模な公共工事の実施は極めて困難になってきており、今後は小規模なダム建設が重要視されるものと考えられる。本研究では、ダムが溢れることを許容する新しい治水の概念(以降では、越流型もしくは、カスケード型と呼ぶ)に基づき、大規模ダムの代わりに複数の小規模な流水型ダム群を直列に配置することによる洪水制御能力について数値シミュレーションにより検討した。すなわち、カスケード型の洪水制御方式とは、直列配置されたダム群において、山間部の上流側のダムで非常用洪水吐きから溢れることで、一般的にはより重要な下流側に対する洪水制御能力を効率的に引き出すことを期待するものである。

従来のダムによる治水の考え方は、直列に配置されている場合であっても個々のダムで基本高水流量に対して計画高水流量を定め、それぞれのダムが溢れないように洪水処理を行うものである(以後、従来型)。本研究では、このような従来の考え方に基いて配置された従来型の流水型ダム群3基(堤高 $100\text{m}$ )と、上流側のダムについては非常用洪水吐きからの越流を許容する新しい概念に基づき配置された同じスケールの流水型ダム群3基(以後、越流型もしくはカスケード型)において、洪水制御能力がどのように異なるのかを比較した。

まず、従来型の洪水制御に基いて、3基全てのダムがオーバーフローしない限界の計画高水流量 $Q_a$ をトライアル的に求めたところ、ある条件では上流側から $Q_a=6773(\text{m}^3/\text{s})$ 、 $5646(\text{m}^3/\text{s})$ 、 $4792(\text{m}^3/\text{s})$ となった。その結果に基づいて、最下流の $Q_a$ によって3基の $Q_a$ を同一とした越流型の場合を計算した。ここでのピーク流量 $Q_p=8887(\text{m}^3/\text{s})$ の基本高水に対して、従来型と越流型の各ダムからの放流量の時系列をそれぞれ図-3、図-4に示す。これより、最下流のダムからの最大放流量を比較すると、越流型では従来型よりも平均で7%程度低く抑えられており、越流型では洪水制御能力が強化されることが分かった。しかしながら越流型では、ピーク流量が $Q_a$ 以下

(ここでは $4540\text{m}^3/\text{s}$ )で洪水制御能力(すなわち、貯水容量)にまだ余裕がある。そこで前述の結果を踏まえ、越流型の貯水容量を最後まで使用するように、3基のダムで同一の $Q_a$ を最下流のダムでオーバーフローしない限界まで小さくした。ここでの越流型の各ダムからの放流量の時系列を図-5に示す。その結果、越流型における最下流のダムからの最大放流量は、従来型と比較すると平均で26%小さくなることが分かった(本条件では最大放流量 $4000\text{m}^3/\text{s}$ で17%減少)。

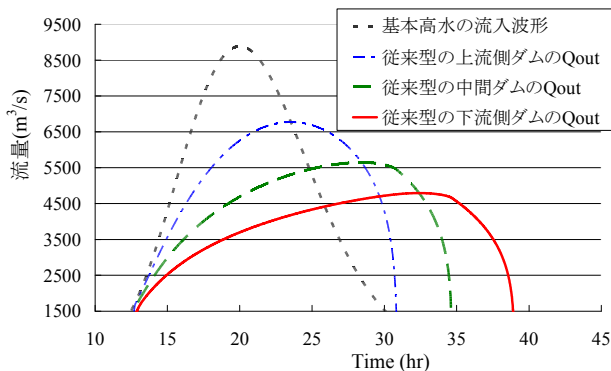


図-3 従来型における流量の時間変化

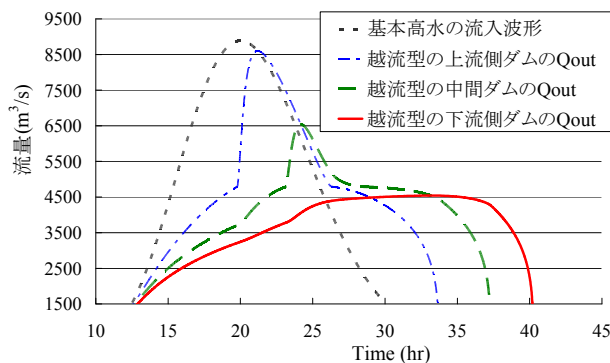


図-4 図-3の条件において $Q_a$ を最下流のダムの値で一定とした越流型における流量の時間変化

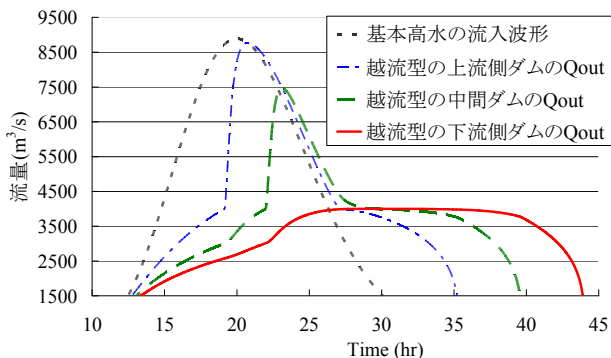


図-5 図-4の条件において最下流のダムの貯水容量を使い切るように $Q_a$ を小さくした越流型における流量の時間変化

本研究の結果、複数の流水型ダムが直列に配置された場合、従来の考えに基づいた越流を許容しない流水型ダム群と比較して、山間部の上流側のダムで非常用洪水吐きからの越流を許容することで、一般的にはより重要となる下流側の洪水制御能力が顕著に強化されることが分かった。なお、本研究で提案された上流側のダムの越流を許容するカスケード方式は、従来から一般的に用いられているゲート操作を行う貯水型ダム群にも適用可能であり、従来は禁じ手とされてきた“但し書き操作”を大規模洪水に対してはむしろ積極的に活用することに相当する。この方法では、既存ダム群の操作方法を変えるだけで更なる洪水制御能力を引き出せるため、今後の地球温暖化による災害外力の増加に対する適応策としても利用価値は極めて高いものと考えられる。また越流型の本治水方式では、上流側のダムから貯水容量を目一杯使って洪水制御を行うため、現行操作では(支川からの流入がない場合などにも)起こり得る、“下流側のダムでは溢れて大きな被害が生じたにも拘わらず、上流側のダムでは貯水容量に余裕が残されていた”というようなダム批判の種は起こりえない。

## 8. おわりに

本研究を総じて言えば、流水型ダム単体の機能の高度化を図るとともに、カスケード方式に基づく流水型ダム群による洪水制御手法を実用化して、元々環境へのインパクトが少ない流水型ダムの堤体の小型化を図ることで(それにより、アースフィルやロックフィルダム型式とすることも可能となる)、本格的な「環境(保全)」と「防災(治水)」の融合の実現を目指すものである。ここで得られた2章から7章の研究成果を統合することで、山間遊水池としての流水型ダムの高機能化が実現される。したがって、複数の小規模な流水型ダムを山間遊水池として適切に構築・管理することで大型ダムに依らない持続可能な治水が実現されることになる。

**謝辞:** 本研究の大部は、国土交通省建設技術研究開発助成の援助のもとに実施された。ここに記して深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 戸田祐嗣, 池田駿介, 熊谷兼太郎: 礫床河川における洪水時の流れおよび浮遊砂・栄養塩輸送に関する数値計算, 水工学論文集, 第46巻, pp. 1121-1126, 2002.