

## 論文審査結果の要旨

### 巨岩・巨石の多い山地河川における洪水解析法と巨石の始動の評価に関する研究

都市人間環境学専攻 大野 純暉

#### 研究背景と目的

近年、気候変動の影響により洪水が激甚化・頻発化している。山地河道から河口まで洪水流・河床変動を一体的に評価できる解析法を確立し、流域全体で安全でバランスのとれた河川管理を実行できることが求められる。特に巨岩・巨石の多い山地河川では、ダム下流部における洪水の流下能力の評価と中・下流域への巨石の移動の評価が可能な洪水流と河床変動の解析法が必要となる。

山地河道は、巨岩・巨石から砂、シルトまで幅広い粒度分布で構成され、洪水時の巨岩・巨石周りでは複雑な流速分布・圧力分布が発生し、これらが流れの主要な抵抗要因となる。大洪水時には、数 m 大の巨石が移動し、これによって周辺の砂礫が大量に移動する。巨石の移動は水棲生物の生息場、産卵場を乱す等、治水面だけでなく河川環境面でも大きな影響を与える。しかし、山地河川の洪水時の流れと巨石や石礫等の移動に関して、国内・外において信頼できる観測・解析が少なく、未解明なことが多い。

本研究では、太田川の支川滝山川（広島県）の温井ダム上・下流部、石狩川の大雪山ダム下流部（北海道）の洪水流の流動と巨石の始動を検討対象としている。これは、巨石の多い山地河川の流下能力、特に、ダム下流等の山地河道の流下能力を適切に評価する方法がないことが、災害多発の原因と関係しており、ダム下流河道の合理的な治水計画の策定方法の確立は喫緊の課題となっている。このような背景のもとに、巨岩・巨石の多い山地河川における洪水流の解析法と巨石の始動の評価について水理学視点から新しい解析法を提案し、現地観測データと比較検討することで解析法の有効性を示している。

#### 本論文の内容と成果

本論文は5章で構成され、各章の内容と成果の概要は以下の通りである。

**第1章**の「序論」では、研究の背景と目的、本論文の構成を示している。

**第2章**の「既往研究と本研究の位置づけ」では、巨岩・巨石の多い山地河川における洪水流解析と洪水時の巨石の始動に関する既往研究を概観し、複雑な洪水流を解析できる信頼し得る研究が少ないことを示し、新しい解析法の必要性を述べている。巨岩・巨石は、そのまわりの三次元的な流れの圧力分布・流速分布を解析し、形状抵抗を評価できる洪水流解析法が必要である。このような洪水流解析法には、内田らによる GBVC 法がある。GBVC 法は、物体周りの急変流を解析可能であるが、物体背後で逆流域が生じる場合には、底面の境界条件として剥離渦モデルを別途与える必要がある。巨岩・巨石が点在している山地河川では、各巨石からの流れの剥離解析は容易でないことから、山地河川の底面にある巨石等の形状を適切に取り込める新たな解析法の構築が必要であることを述べている。

**第3章**「山地河川における洪水流解析に有効な準三次元解析法の構築とその適用」では、まず滝山川・石狩川上流部の巨岩・巨石の多い山地河川において、巨石の大きさや配置が分かる地形データを、ドローン等を用いて詳細に計測した。山地河川では、巨石群から成る境界形状に起因する圧力・流速の変化を直接的に評価できる水表面・底面境界の運動方程式を新たに組み込んだ非静水圧準三次元解析法（Q3D-FEBS）を構築した。

次に、滝山川、石狩川山間部における詳細な地形測量データと観測水面形の時系列データを用いた Q3D-FEBS を既往最大洪水に適用した。その結果、複雑な山地河道特性を持つ両河川において、現地の巨石群については圧力勾配、それよりも細かい現地材料については一定の粗度係数を用いることにより、洪水水面形の時系列、流量ハイドログラフ等を高精度に解析できることを示した。また、巨岩・巨石の形状とともに、周辺の道路高・堤防

高や建物高さ等のデータを得ることによって、洪水時の水位・流速分布と守られるべき道路・堤防高の比較検討も可能になり、洪水流下能力の算定を可能にした。本研究で対象とした洪水は既往最大洪水であったにもかかわらず、洪水前後の現地調査から、移動する巨石の数は非常に少なかったこと、巨石の移動がなければ周辺の石礫も多く移動しないことから、巨石が移動しないとした本解析法は適用性が高いことが明らかになった。

以上より、山地河川においては、巨石群による流れの圧力場・流速場の変化を適切に取り込むことが可能な Q3D-FEBS によって、これまで扱うことが出来なかったダム下流河道の流下能力の検討が可能となり、治水計画のネック箇所であったダム下流区間の改修検討を可能にした。

**第 4 章「洪水時の観測水面形に基づく Q3D-FEBS と個別要素法をベースとした河床巨石の始動の評価法」**では、滝山川温井ダム上流部の 2 つの区間（サイト I、II）を対象に、令和元年（R1 年）洪水（流量：310m<sup>3</sup>/s）と既往最大洪水に匹敵した令和 2 年（R2 年）洪水（流量：720m<sup>3</sup>/s）について巨石の移動状況を調査した。R1 年洪水では流量規模が小さかったために検討対象区間では、巨石は 6 個しか移動しなかったが、R2 年洪水時にはサイト II では 26 個の巨石の移動が見られた。しかし、巨石が移動しても移動距離は数 m 程度であり、巨石と石礫を主体として形成されている瀬の形状は洪水前後でほとんど変化しないことが分かった。また、巨石の移動は洪水流れの主流部が見られ、他の巨石や石礫とのかみ合わせが弱い状態にあった。

次に、巨石の始動評価のために、圧力分布と底面せん断力分布から流体力を評価できる実用的で精度の高い Q3D-FEBS に、巨石に作用した接触力を表現可能な DEM を組み合わせ、巨石始動の解析法を構築した。巨石形状を球と仮定し、周囲の石礫群も球形状として表現し、巨石に作用した接触力を評価した。巨石に作用する流体力と接触力を用い三次元の剛体の運動方程式、回転の方程式を解くことで、洪水による巨石の始動を検討した。

巨石の始動解析から、洪水時の流速が 5(m/s)以上となる主流部に位置した巨石は、1 粒径以上移動し、相対的に流速が低い位置に存在した巨石は、1 粒径以下の移動を示した。解析結果は、低い流速位置にあった巨石については観測値を再現し得たが、主流部にある移動した巨石、移動しなかった巨石については、約半分程度の再現性であった。これらの結果から、巨石の水中重量を用いて無次元化した流体力値が 0.3 以上となると、巨石は移動すること、下流側の石等により巨石が支えられている場合はその値が 0.5 以上としないと移動しないことが明らかになった。

**第 5 章「結論」**では、本論文で得られた成果を総括し、今後の課題を示している。

巨岩・巨石の多い山地河川の洪水流解析法として新たに Q3D-FEBS 法を構築し、圧力分布、流速分布より巨岩・巨石に起因する形状抵抗と、巨石以外の河床材料である石礫等に起因するせん断抵抗を一定の粗度係数を用いて評価することによって、複雑な地形と洪水特性を有する山地河川の水面形や流量ハイドログラフ等の洪水の流動を表現し、山地河川の洪水流下能力の評価や洪水予測等を可能にした。さらに Q3D-FEBS と DEM を組み合わせ、洪水による巨石の移動の解析法を構築し、現地河川の巨石の始動を算定する解析法を提示した。

今後の課題は、巨石によって保護されている周辺の石礫群が大洪水によって洗掘を受け、巨石が移動することによって大規模な河床変動をもたらすことが考えられることから、大規模な河床変動を Q3D-FEBS と個別要素法 (DEM) に新たに河床変動を表現するモデルを組み合わせ、推定できるようにすることである。

本研究では、これまで学術的、工学的に十分扱えなかった巨岩、巨石の多い山地河道の洪水流の水利現象を、新しい観測技術と解析技術に基づき高精度に予測可能にしており、さらに山地河道の巨石の始動解析を可能にし河床変動解析につながるものである。その研究成果は創造性に富み、学術的に新しい研究分野を切り開き、また工学的には河川流域の治水上の安全性向上に高く貢献するものである。よって本研究論文は、博士（工学）に値すると判断された。

