

巨岩・巨石の多い山地河川における洪水流解析法と巨石の始動の評価に関する研究
FLOOD FLOW ANALYSIS AND EVALUATION OF INCIPIENT MOTION OF LARGE
BOULDERS IN MOUNTAIN RIVERS

都市人間環境学専攻 大野 純暉
Civil, Human and Environmental Science and Engineering, Jyunki Ohno

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・頻発化しており、流域全体の地形、地質や人々の住まい方の状況を踏まえ、洪水災害を適切に抑えるための治水対策（流域治水）が求められている。このためには、洪水流と土砂移動を山地から河口まで一体的に評価できる洪水流・河床変動解析法を確立し、流域全体でバランスのとれた河川管理を実行する必要がある。特に巨岩・巨石の多い山地河川では、洪水時の中・下流域への洪水・石礫の流出量の評価とダム下流部における洪水の流下能力を評価できる適切な洪水流と河床変動の解析法が必要となる。

山地河川は、巨岩・巨石から砂、シルトまで幅広い粒度分布で構成され、洪水時には巨岩・巨石周りでは複雑な3次元的な流動に伴う流速・圧力分布が発生し、主な抵抗要因となる。大洪水時には、数m大の巨石であっても移動する可能性があり、これによって周辺の砂礫が大量に移動し、流れや河道形状を変化させ、このことは水棲生物の生息場、産卵場を乱す等、治水面だけでなく環境面にも影響を与える。しかし、山地河川の洪水時の流れと石礫等の移動に関して、国内・外において信頼できる観測データが少なく、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、石狩川の大雪ダム下流部（北海道）の山地河川の洪水流と巨石の始動を検討対象としている。温井ダムのダム地点では計画流量 $2900\text{m}^3/\text{s}$ に対して、洪水ピーク時のダムでの洪水調節量は $1800\text{m}^3/\text{s}$ で計画を定めている。しかし現状は、ダムからの最大放流量 $400\text{m}^3/\text{s}$ に限定している。これは、巨石の多い山地河川の流下能力を正しく評価できないことと関係しており、ダム下流等の山地河道の流下能力の評価と河道改修は喫緊の課題である。

また、上流からの供給土砂量が減少している山地河川では、魚類等の生息環境に影響を及ぼしており、これらの対策の一つとして、巨石群から成る自然工を設置し、生物環境の改善を図っているが、巨石がどの程度の洪水流量まで留まり、自然工の機能を維持できるのか等を推算する技術力が十分でない。巨石の始動を水理学的考察に基づき評価できれば、山地河川の治水と環境の調和した親和性の高い川づくりが可能になると考えられる。

これらの観点から、本研究では、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法について水理学視点から新しい解析法を提案し、解析結果と現地データとの比較検討することでその有効性を確認する。

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に関する既往研究と洪水時の巨石の始動に関する既往研究を示し、本研究で提示する新しい解析法の位置づけとその意義を述べている。

これまで河川中・下流域の洪水流解析法として、河道の横断測量データ（約200m間隔）と洪水時

の観測水面形を用いた平面二次元解析法が広く用いられている。この理由は洪水中に河道内で起こっている流れの現象や河床の変動は洪水時の観測水面形の時間変化に現れるため、観測水面形の時間変化を再現するように平面二次元解析を行なうことで、洪水流と土砂移動の説明が出来る為である。

しかし、上記で示した緩流河川の解析法を山地河川に適用すると、河床に巨岩・巨石が多いため、大きな値の粗度係数を与えないと観測水面形を再現出来ず、また物理的な意味の説明が困難な流れの状況が表れる。その原因は、第一に 200m 間隔の地形データでは、多くの巨岩・巨石が集積し、河床を形成している状況を表現出来ないこと、第二に、巨岩・巨石は形状抵抗として評価する必要があり、鉛直方向に流速分布を一様とした平面二次元解析では、巨岩・巨石から成る河道の抵抗を扱うことができない点にある。従って、巨岩・巨石の形状抵抗の評価に必要な巨岩・巨石まわりの圧力・流速分布を解析可能な洪水流解析法が必要となる。

上述の問題から、巨岩・巨石を含む複雑な底面境界下における三次元流れを解析可能で、かつ現地スケールにも適用可能な洪水流解析法として、観測水面形に基づく非静水圧準三次元解析法が必要とされる。このような解析が可能な非静水圧準三次元解析法として、内田らによる GBVC 法がある。GBVC 法は、構造物周り等の急変流も解析可能としているが、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。大きさ、形状の異なる巨岩・巨石が複雑に配置された山地河川では、巨石からの剥離を適切に推定する事は容易でない。本章では、点在する巨石周りの三次元流れ場を解析可能な山地河川の新しい洪水流解析法と、それを可能とする為の現地観測について述べている。

さらに、山地河川の大洪水時に起こると考えられる巨石群の始動に関する研究は、国・内外でほとんど行われておらず、実態はよく分かっていない。巨岩・巨石から成る山地河道に形成される step-pool や礫列の破壊、形成等の局所的な水理現象に関する調査研究は行われているものの、山地河川の広範囲にわたって適用可能な精度の高い洪水流解析法がないことから、巨石の始動の評価につながる研究結果はないに等しい。巨石の始動を評価する為には、山地河川の流れの三次元性に基づく巨石に作用した流体力と周囲の石群から受ける接触力の評価を考慮した新しい解析モデルが必要とな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、ドローン等を用いて巨石の大きさや配置が分かるような地形データを詳細に計測した。次に山地河川に適用可能な観測水面形に基づいた洪水流解析法を構築するために、観測された巨石の形状を含む詳細な地形測量データを取り込んだ平面二次元洪水流解析を行い、その解析結果から得られた課題を分析した。その結果、平面二次元解析では、如何に詳細な底面の情報と洪水観測水面形を条件とした計算を行っても、巨石まわりの水位・流速分布に極端な計算誤差が含まれる結果となった。これは、平面二次元解析では、巨石まわりで卓越する圧力の非静水圧成分や流速鉛直分布の変形を考慮できず、大きな粗度係数の値を採用せざる得ないことを示した。

以上の検討から、巨石の多い山地河川では、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導入した非静水圧準三次元解析が必要であり、そのための新しい解析法 (Q3D-FEBS) を構築した。Q3D-FEBS 法は内田らによる GBVC 法に比して、山地河川を含む複雑な地形や河道形状を有する流れ場に適用でき、かつ精度の高い方法である。

この Q3D-FEBS 法を用いて、滝山川の検討対象区間において、詳細河道地形測量データ (平均 1cm 間隔) を用い、実用的かつ高い精度で山地河川の洪水流解析が可能な計算格子幅について検討した。計算格子幅は約 1.0m とすれば、巨石の多い河道の洪水流について十分な解析精度が得られることを確

認した。ただし、個々の巨石の始動を解析する為には 1.0m の格子幅では解析精度が低くなるため、第 4 章の巨石の始動解析の検討では、計算格子幅は 0.5m とする必要性も示した。

次に、1.0m の計算格子を用い、詳細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 を滝山川、石狩川の山間部における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、山地河川の流れ場の解析を可能とした。また、巨岩・巨石の形状とともに、周辺の道路・堤防高や建物の高さ等も測量することによって、洪水時の水位・流速分布と道路・堤防高の比較検討も可能になった。以上より、これまで検討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、治水計画の大きなネックであったダム下流区間の改修計画を高精度に検討可能にした。以上より、巨岩・巨石の配置状況が異なる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 を適用することによって、山地河川の複雑な流れ場の解析が可能になり、その治水計画上の応用性の高さを明らかにした。

本研究で対象とした洪水は既往最大洪水であったが、第 4 章で示すように、洪水前後の河床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考えた山地河川の本解析法は、水面形、流量等の洪水流の算定精度は十分であることが明らかになった。

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、巨石の移動状況を令和元年（R1 年）洪水（流量:310m³/s）と温井ダム完成後既往最大洪水に匹敵した令和 2 年（R2 年）洪水（流量:720m³/s）について巨石の移動状況を調査した。また、第 3 章で示した詳細な地形測量結果と観測水面形に基づく Q3D-FEBS に個別要素法（DEM）を加えた巨石の始動を解析可能にする新しい解析法を構築し、この解析結果と現地調査結果に基づく洪水前後における河床場の変化を比較検討することで、新たに構築した解析法の有効性を明らかにした。

現地調査の結果、R1 年洪水では流量規模が小さかったために巨石の移動は殆ど見られなかったが、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、R2 洪水においても大量の巨石が移動することはなく、移動してもその移動距離は数 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ほとんど変化しないことが分かった。また、洪水時に流れの主流部で巨石の移動が見られ、これらの巨石は他の巨石や石礫とのかみ合わせが弱い状態にあったことが分かった。このことは、R2 洪水のように大きな規模であっても、河床形状はほとんど変化しなかったことから、巨石が移動しないと考えた第 3 章の洪水流計算法が本章でも適用可能であることを示す。また、詳細地形測量結果と観測水面形に基づく Q3D-FEBS は巨岩・巨石まわりの三次元流れを概ね説明できており、現地調査で見られた洪水前後における巨石前面での河床材料の粗粒化や、巨石背後に貯まっていた砂の流出等をよく説明している。しかし、一度巨石が動くと周辺の石礫・砂も大量に移動すると考えられ、山地河川の河床変動を議論する為には、まず巨石の始動機構について明らかにすることが重要である。

以上のことから、巨石の始動評価のために、詳細地形測量結果と観測水面形に基づく Q3D-FEBS に、巨石に作用した接触力を表現可能な DEM を組み合わせた巨石の始動解析法を構築した。近年、三次元流体解析と DEM を用いた精度の高い土砂輸送解析法が展開されているが、実河川では広い計算範囲が求められることから、この解析法の河川の適用は困難であり、工学的に有用な解析手法の開発が求められる。

そのため巨石に作用する流体力の算定には、非静水圧成分を含む圧力と底面せん断力分布による流

体力を評価できる実用的で精度の高い Q3D-FEBS を用いるのが適切である。その際、実際の巨石形状は複雑な三次元形状を有しているが、多くの巨石の三次元形状データを計測する事は困難である為、巨石形状を球として検討した。また、巨石周辺の河床状況を表現するために、詳細地形測量結果を基に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 DEM によって評価した。Q3D-FEBS から求まる流体力と、DEM から求まる接触力を外力とする三次元の剛体の運動方程式、回転の方程式を解くことで、洪水によって巨石が始動するかどうかを検討した。

尚、R1 年、R2 年洪水時に巨石に作用した流体力を解析した結果、洪水規模の大きかった R2 年洪水時の方が流体力はやや大きくなったものの、大きさはあまり変わらなかった為、R2 年洪水を対象に巨石の始動解析を行なった。また、巨石に作用した流体力は、圧力の非静水圧成分が大きく、底面せん断力は極めて小さかった。従来行ってきた底面せん断力で巨石の移動を評価することは過小評価となり、流体力の評価は Q3D-FEBS 法によって検討する必要があることを示した。

Q3D-FEBS と DEM による巨石の始動解析を行なった結果は以下の通りである。洪水時の流速が 5m/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、相対的に流速が低くなる左岸側に位置した巨石は、1 粒径以下の移動を示した。この解析結果と実際の巨石の移動状況を比較すると、左岸側の移動しなかった巨石については、解析においても再現していたが、主流部にある観測上移動した巨石、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。これらより、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、巨石は移動する可能性があること、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 以上とならないと移動しないことを示した。

解析結果と現地データとの差異の原因は以下のことが考えられる。第一に、巨石や河床を構成する石礫形状を球と仮定しているため、粒子間のかみ合わせが十分反映されず、河床中に一部埋まってる巨石は動きにくく、これらのことを解析では十分表現できていないこと、第二に、移動している石礫や巨石との衝突力や巨石周辺の河床が洗掘されることで始動する機構を考慮していないことが考えられる。

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に適用可能な詳細地形測量データと観測水面形に基づく Q3D-FEBS 法を新たに構築し、山地河川の洪水に適用した。その結果、河床にある巨岩・巨石に作用した形状抵抗を圧力分布、流速分布より評価することで、河床に作用している力を合理的に決定され、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することが可能となった。これにより、詳細地形データや洪水観測水面形を用いてもなお、粗度係数が時空間的に大きく変化し、物理的意味が説明できない従来の洪水解析法に代わり、本解析法によって山地河川の洪水の流下能力の評価や洪水予測等を可能にすることを示した。

さらに Q3D-FEBS と DEM を組み合わせた新たな巨石の始動の解析法を用いることによって、山地河川で生じている巨石の移動状況を概ね説明できることを示した。しかし、巨石の始動から河床変動につながる山地河川の解析法には未だ課題が残されている。

今後の主要な検討課題として、本研究では、巨石まわりの河床の洗掘によって生じる巨石の移動や、巨石によって保護され、巨石まわりに堆積していた石礫群の移動の評価等、山地河川の河床変動の解明につながる解析法の構築までには至っていない。本研究で示した洪水観測水面形に基づく Q3D-FEBS と DEM を組み合わせた解析によって、巨石の始動から移動までを解析可能となるよう発展させて、さらに従来の石礫河川の河床変動モデルを組み合わせることで、洪水流と巨石・土砂移動を伴う河床変動を計算可能な解析法を開発することが今後の課題である。