

魚道への応用を意図した溪流の河床形態に関する研究

学位論文内容の要旨

自然環境の保全に対する社会的な機運の高まりの中で、近年、河川環境を対象にした近自然型の保全技術や復元・創造技術が模索され始めている。山間部の「溪流」も例外ではなく、その河床形態や流れの性質に関する知見が必要不可欠となっている。本研究では、自然溪流にみられる様々な河床形態のうち、小規模の単位形態である礫列および礫段の形態（以下、これを「小規模河床形態」という）を重点的に取り上げ、その性質の解明を目的とした移動床実験および理論的な検討を行うとともに、その応用として、それらの形態を安定的に維持し得る近自然型の魚道設計法を新たに提案した。

小規模河床形態の成因・形成機構については、これまでの土砂水理的な研究によって、反砂堆の形成、河床砂礫の活発な移動と分級、反砂堆クレスト付近での大礫の停留、さらに礫段の場合には反砂堆の波長と斜め交錯波の共振化によるものであることが明らかにされている。しかし、その形成条件として重要な役割を果たすと考えられる河床材料の粒度分布特性については、“一様粒径の砂で構成されている河床には小規模河床形態が形成されない”とする指摘以外、ほとんど見当たらない。この点を明らかにするため、揖斐川支川の白谷および豊平川支川の小川における河床材料調査で得られた河床表層砂礫の粒度分布データを考察した。その結果、それらの粒度分布が $\{P=(d/d_{\max})^n, n=1/2\sim 3/4\}$ で表されるTalbotの曲線によく従うことを見出した。この曲線は、コンクリート骨材など混合材料に最大密度を与える粒度分布の理想曲線としてTalbotが実験の結果から提示したものであり、上式の指数 n が $1/2\sim 1/4$ の場合に最大の密度となるとされている。併せて、粒径別表層砂礫の体積占有割合に関する保存式を用いて、波状の掃流力によって分級を受けた河床砂礫の定常粒度分布を理論的に推定した結果、これが $n=3/4$ のTalbotの曲線に非常に近い曲線を描くことを確認した。

次いで、Talbot型の砂礫粒度分布、流量および流路勾配を種々変化させた移動床実験を行い、溪流にみられる河床形態が実際にどのような条件下で形成・安定化し得るのかを観察するとともに、その形状特性および流れの基本的な性質を明らかにした。

すなわち、Talbot型粒度分布であるA砂礫 $\{P=(d/d_{\max})^{1/2}\}$ 、B砂礫 $\{P=(d/d_{\max})^{1/4}\}$ 、および非Talbot型粒度分布（片対数紙上で上に凸形）であるC砂礫による実験を多数実施し、①A砂礫およびB砂礫実験では、反砂堆の形成、砂礫の分級、反砂堆峰付近での大礫の停止という過程を経て小規模河床形態が形成されること、②非Talbot型分布のC砂礫実験では、反砂堆が形成されるものの、これに最大径礫の移動を停止させるような働きが認められず、結果として、小規模河床形態が形成されないことを確認した。また、小規模河床形態が形成された砂礫床表層の粒度分布が、いずれも $\{P=(d/d_{\max})^{1/2\sim 3/4}\}$ の分布形をなしていることを明らかにした。以上の結果から、河床表層部の粒度分布が指数 $n\geq 1/2$ のTalbot型分布であること、あるいは、この分布に至ることが、小規模河床形態が形成・安定化する重要条件であるこ

とを指摘した。

さらに、初期勾配1/10の実験砂礫床を用いた一連の実験において、沖積部の交互砂州に酷似した「砂礫堆」が礫列・礫段に共存する形で発達することを初めて確認した。これら砂礫堆の発達に伴い形成される長波長の河床波は、これまで現地観測等でその存在が指摘されていた中規模河床形態であると考えられる。非Talbot型分布のC砂礫実験にあっても、交互砂礫堆が発達することで小規模河床形態の形成が促されることを見出した。すなわち、交互砂礫堆の発達に伴う流れの偏流により掃流力が増して河床砂礫の移動・分級が進む部分と、掃流力が減少して河床砂礫が堆積する部分とが生じ、砂礫堆部ではほぼ元河床の状態が維持されるのに対して、流れが集中する水みち部および転向部では、その直上にできた砂礫堆によって上流からの砂礫の流下が妨げられ、徐々に砂礫床表層の分級と粗粒化が進み、やがて小規模河床形態が形成・安定化することが知られた。水みち部では、共存する礫列・礫段のプール深が深くなり、より自然に近い魚道の再現を保証する。

次に、実験砂礫床上における小規模・中規模河床形態形成時の流れの抵抗則がHey式によく従うことを確認した上で、そのべき関数近似式を用いて、小規模河床形態の波高 Δ および波長 λ の推定式を理論的に導いた。これらは、流れが射流の条件下で限界掃流力状態となる礫の径が Δ に、砂礫床に形成される反砂堆の波長が λ にそれぞれ等しいものとして導いたものであり、上述の実験砂礫床で得られた波高・波長データによく適合することを確認した。また、実験砂礫床に形成された砂礫堆の形状について、沖積河川の交互砂州形状とと比較した結果、波長に関して両者がほぼ一致する場合と、実験値が計算値のほぼ3倍程度になる場合の2通りの結果があることを見出した。後者は、通水初期に交互砂州波長に等しい砂礫堆が発達するものの、射流および交互分級の作用を受けて砂礫堆の前傾斜部から対岸に向かう流れがその砂礫堆を乗り越えてしまうという現象、すなわち砂礫堆の統合が生じた結果と考えられる。

一方、小規模河床形態（礫列）を想定した固定床での実験から、勾配一定の条件のもとで流量が増加していくと、小規模河床形態上には順に、完全越流状態でステップ部を越える流れがほぼフラットなプール面上に落下・拡散してエネルギーを失うような「落下流」、ステップを越流した流れがプール部で潜り跳水を起こす「潜り流」、ステップを越流した流れがその直下ないしはプール部で跳水を起こし、跳水の下流にS1曲線からM1曲線に接続する膨らんだ水面を伴う「跳水流」、ステップ部およびプール部の全域において射流状態で流下するような「射流」が現れることを確認した。そして、これら4つの流れは、池内・山田らの理論の応用を図ることで概ね分類できることを示した。

最後に、以上の実験および理論的な考察を通して明らかにした小規模・中規模河床形態の形状・構造を持続的に再現し得る近自然型の魚道設計法を提案した。すなわち、①想定するダムバイパスなどにおいて計画流量を定めるとともに、現地砂礫の最大粒径を知る、② $n=1/2$ のTalbot分布砂礫を想定して砂礫堆の発生条件に従う幅を決める、③提案式によって礫列の波長・波高を求め、基礎処理をおこないながら84%通過篩程度の礫を順次並べ固定化する、④ $n=1/2$ のTalbot分布砂礫を一面に敷き詰め、計画流量規模の通水によって砂礫堆の自然形成作用による形状形成をおこなうというものである。この魚道は、溪流魚類等を対象とする移動装置としての機能のみならず、魚類の棲み場所となり得るものと期待される。また、その機能が全く損なわれる満砂状態にあっても、ある一定以上の流量を得ることで自らの形状を再現・維持し得るという維持管理の面でも極めて有利な性能を有することを実験的に検証した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 田 睦 博

副 査 教 授 板 倉 忠 興

副 査 教 授 佐 伯 浩

学 位 論 文 題 名

魚道への応用を意図した溪流の河床形態に関する研究

山地溪流における砂防ダムや貯砂ダムに魚道を設置し、魚類の往還を保证する必要性が高まっている。しかし、当該区魚道は土砂による埋没が多く対策が望まれている。本研究は、溪流に自然形成する階段状河床波(礫列)を魚道として利用するという新しい考えにたって上述の問題を解決することを目的にしている。そのために、2章から6章において溪流の階段状河床波、ならびにそれらによって構成される淵・瀬の形成条件、流れの諸性質が実験および理論解析によって明らかにされている。これらの結果を受け、7章において新しい魚道の設計法が提示され、あわせて企図した機能の検証実験がなされている。新提案の魚道は、一時的土砂埋没が生じた後にも人為手段なしに自己修復する優れた機能を示した。

本論文は、8章より構成されている。

第1章は、山地溪流における魚道問題の背景、「移動装置」としての魚道から「溪流再生」魚道への発展という着目点、ならびに論文の目的と章構成が述べられている。

第2章は、溪流河床形態に関する従来研究のレビューがなされ、あわせて著者が注目する河床形態の多数の実測例が提示されている。これらから、階段状河床波の成因におよぼす河床砂礫粒度分布の影響が未解明であること、中規模波と称されるこれより長い波長の河床波に関する研究が皆無であることが示されている。

第3章は、溪流の河床表層粒度分布の調査結果、およびその特性の理論的説明が示されており、以下の新知見が得られている。

(1)揖斐川支川・豊平川支川など5溪流で得られた河床砂礫粒度分布は、いずれもコンクリート骨材の粒度分布表示に多用されるタルボット型粒度分布関数によくあてはまる。

(2)関数中の最適パラメータのべき数は、コンクリート骨材の締め固め密度を最大にする数値に一致している。

(3)波状河床せん断力によって分級を受ける河床砂礫に、粒径別砂礫存在率の保存式および粒径別流砂量式を適用し、存在率定常化の必要条件を満たす粒度分布を求めると、それらはタルボット型分布に近づく。

第4章は、本論文前半の中心をなす章である。2種類のタルボット型粒度分布をあたえた混合粒径砂礫(A砂礫、B砂礫)、および非タルボット型粒度分布をあたえた混合粒径砂礫(C砂礫)を用いた多数の実験により、階段状河床波(礫列)の形成に及ぼす粒度分布の影響、

および中規模河床波が及ぼす影響が述べられている。結果は以下になる。

(1) A, B 砂礫河床においては階段状河床波が速やかに形成されるのに対し, C 砂礫河床ではその形成が認められない。河床砂礫のタルボット型粒度分布保有の条件が, 階段状河床波の形成条件に新たに付け加えられる。

(2) 実験中発生が認められた中規模波(砂礫堆)は, 沖積河川で広く見出される交互砂州に類似する性質を有している。ただし, 統合化による波長の延伸が高い頻度で起きる。

(3) 中規模波が現れる場合には, C 砂礫においても階段状河床波が共存する形で発生する。また, 中規模波上を蛇行する流れの転向部直下流部において相対的に深い淵が形成され, 自然溪流に非常に近い形態が生ずる。

第5章は, 階段状河床波の波長と波高を推定する理論式の誘導がなされている。それぞれ, 既往の概念にもとづいて求められたものであるが, 独自の改良がおこなわれ実験値との照合によって信頼性の高い結果を得ている。

第6章は, 人工的に作製した階段状河床波実験により, さまざまな流量規模における流れの性質が調べられている。それらは「落下流」「潜り跳水流」「跳水流」「射流」に分類され, ベルヌイ式を用いた既往の理論を修正した区分式により推定し得ることを示している。

第7章は後半の中心となる章である。前章までの結果の魚道への応用が述べられ, 以下の新しい魚道の設計法が提案されている。また, その機能の検証実験がなされている。

① 魚道を設置するダム・堰等が立地する「対象溪流」の流量観測資料あるいは現地河床状況(粒度分布)などから, 魚道設計流量を定める。②べき数 $1/2$ のタルボット分布砂礫を想定して, 中規模河床波(砂礫堆)の発生条件にしたがう魚道幅を決める。③5章の提案式によって階段状河床波の波高・波長を求め, 基礎処理をおこなって波高相当の礫を横断方向に順次並べて固定化する。④べき数 $1/2$ のタルボット分布砂礫を一面に敷き詰め, 設計流量を通水することによって自然な河床洗掘をはかりプール部を形成する。

このような設計法にしたがって実施した検証実験は, 以下のような優れた機能を示した。(1)通水によりプール部の河床洗掘とともに中規模河床波(砂礫堆)が発生し, 相対的に深い淵の部分と浅い瀬の部分が交番的に形成され自然溪流に近い形態になる。

(2)多量の土砂が流入した場合, 一時的なプールの埋没が起こるが, その後に自然な河床洗掘が生じプール部の再形成がはかれる。

第8章は, 本論文の結論が述べられている。

これを要するに, 著者は溪流が本来有する諸性質を砂礫粒度分布・河床形態・流れの側面から明らかにし, 溪流における魚道設計法に対して新知見を得たものであり, 河川工学, 砂防工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は, 北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。