

学位論文題名

連結礫工の流れに対する安定性と流失過程に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、河川の流れを制御する工法として最近開発された連結礫工に対して、流れの中に設置されたときの安定性と流失過程を土砂水理学、流体力学を応用した理論及び水理実験により解明したものである。

連結礫工は複数の礫または玉石がワイヤとチェーンでフレキシブルに連結されたものであり、新しい河川工法として護岸・根固め工や水制工などの材料に用いられるようになってきている。礫をそのまま用いるだけの従来の捨石工と比較して、急な流れの中でも流されにくいことが安定性向上としてのメリットとなるが、材料に現地の石またはそれに類似したものをを用いることができる点や礫間に空隙が生じることで生物の生息空間を創出できる点などの環境面での有効性も兼ね備えていることから、これからの河道改修及び河川管理において大きな期待が寄せられている。

河川の特に速い流れが発生する場所で流れをコントロールする必要性が生じた場合、コンクリートによる強固な構造物を設置するのが従来の方法であったが、昨今の環境保全の意識の高まりを受けて、構造物の安定性を確保しつつ、かつ現況の自然環境にできるだけ負荷をかけない工法が現場から求められるようになり、試行錯誤ののち、この連結礫工が開発されるに至った。しかしながら緊急的な対処などの現場の要請に応じるため、精緻な工学的評価が行われる前に、まず現地実験としての実河川で試行設置が優先されてきた。現地試行実験の実績が蓄積されるにつれて、改めて工法そのものの安定性の仕組みや設計方法についての工学的な説明が必要となった。そこで本研究において、連結礫工に関する基本的性質と流れによる移動・破壊過程について理論的に考察し、その結果をふまえて現場で使用する際の設計の考え方などを提案することとした。

連結礫工の工学的評価を始めるに当たって、連結礫工の構造そのものは礫のつなぎ合わせである点に着目し、単純化すると従来の土砂水理学の考え方に基づいた砂礫の移動としてアプローチすることが可能と判断して研究をスタートさせることとした。

礫の移動・流失を考える場合、その移動限界を明らかにすることから始まる。そこで本論ではまず第2章で砂礫の移動限界、その周りの流れ、構造物として用いられた場合の破壊過程などについて既往研究を整理した。これにより砂礫の移動限界に関する研究は古くから多くの研究者によって取り組まれてきているが、構造物として礫が連結された場合を想定した研究はこれまで全くなされていないことを示した。また連結礫工の現地試行設置例から、連結礫工が河川の現場で多目的に利用できる可能性をもつことと、それに対する工学的な評価を行うことが急務となっていることを示した。

第3章では連結礫工の最も基本的な性質を理解するために、単純モデルとして2個の礫が連結されて河床に配置されたときに、連結の効果としてどのような現象が現れるかについて水理実験および掃流力理論を用いて検証した。当初の予測としては、2個の礫粒子を連結して河床に設置すると、流失しかけた片方の礫をもう一方の礫が引っ張ることによ

て両方が流失せずに河床にとどまり、単体の場合より移動しにくくなるものと考えていた。しかし実験結果は逆であり、理論式による計算結果からも実験と同様に連結したほうが単体の場合より移動しやすいとの結果が得られた。これは 2 個の礫を連結させた場合、片方の礫がもう片方からの引っ張りに耐えている間は両方が移動せずに残り続けるという連結のプラス効果があるものの、その反面、本来単独では移動限界に達しない礫がもう一方からの引っ張りによって移動・流失してしまうというマイナス効果もあわせ持つためであった。

この 2 個連結の結果をふまえて、次の第 4 章では複数の礫が連結されて群体として河床に設置された場合での移動限界と離脱過程について検証した。水理実験では比較として連結されていない礫の場合もあわせて行い、複数の礫を連結した場合には、連結されていない場合より河床から離脱するときの限界流速が増大する結果となった。連結した方が流失しやすくなるとの 2 個連結の場合の結論とは逆の結果に見えるが、連結された礫どうしに作用する力関係を詳細にみると、2 個連結のケースの結論と矛盾しておらず、むしろその応用パターンとして結論づけられることがわかった。つまりつながれている礫どうし各々でみると、安定している側の礫が連結されることにより動きやすくなることは 2 個連結で得られた結論と変わらず、しかし複数の礫が連結されることにより、不安定な礫が離脱しかけて他の礫を引っ張る際に、そこで発生する張力が複数の礫に分散されることとなる。他の礫に作用する張力はその分散の度合いによって礫ごとに変わるが、分散度は各々の礫の位置や礫どうしの距離などによって変わる。このため必ずしも強い張力が不安定な礫に作用するとは限らず、確率的に複数の礫が離脱することが避けられる。これが礫が複数連結された場合に移動限界が向上する仕組みであることがわかった。

連結礫工は様々な用途で河道内に使用されるが、複数個のまとまりとして設置されて流れをコントロールさせることも多い。このため第 5 章では連結礫工を複数層重ねて設置した場合のその重ね方の違いによる移動限界と破壊過程について検証した。力学作用をモデル化するには、礫周辺に生じる流れが複雑となるため、乱流モデルによる流れのシミュレーションを行った。水理実験及び数値計算の結果、これまでと同様に連結礫工の場合は通常の礫積みの方より移動限界が向上することがわかった。しかしながらその重ね方によって連結の効果に大きな違いがでることも明らかになった。これも 2 個連結および群体の場合で明確となったしくみを応用させて考えることが可能であり、不安定な位置にある礫が他の礫を引っ張り始める際に、他方の礫がいかに安定している位置にあるかによって全体の安定性が決まることをつきとめた。

第 6 章では、現場の河川技術者が実際に連結礫工による構造物を設計または設置する際に必要となる具体的な方法について、比較実験によって最適な方法を明らかにし提案した。流れの方向に対する連結礫工の設置方向としては、横置きで設置する方が縦置きで設置するよりやや移動限界値が向上すること、また複数の層で重ねて積んだ場合では、積み重ね方によって限界値が大きく異なり、単純に積み重ねるより、最上層の連結礫工を前面に覆うように配置したほうが格段に流速に対する移動限界値が向上することを示した。

以上のように、本論文ではまず連結礫工に関する基本的性質として、礫が連結されて流れの中に置かれたとき、単体の場合よりむしろ流失しやすくなること、複数の礫が連結されて群体となった場合にもその性質は変わらないが、張力が分散されることにより全体として流失する確率が低くなること、そのためには設置する際の配置および組み合わせ方法が重要となることを水理実験と土砂水理学の考え方を応用した理論で明らかにするとともに、実際の河道改修及び河川管理の現場での具体的な設置方法について提案した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長谷川 和 義

副 査 教 授 清 水 康 行

副 査 教 授 高 橋 正 宏

副 査 教 授 山 下 俊 彦

学 位 論 文 題 名

連結礫工の流れに対する安定性と流失過程に関する研究

・玉石を積み重ねて護岸や流れの制御に用いる「捨石工」(riprap)は、豊富な空隙の存在のために生物に良好な生息空間を提供するほか景観的にも優れており、河川環境の保全・再生の目的から近年使用例が急増している。しかし、これらは構造的に強くはなく、出水時に個々の礫が流失し機能が損なわれる例が増えている。本研究がとりあげている「連結礫工」は、このような欠陥を補うために複数の玉石をワイヤやチェーンで緩やかに結び合わせて房状にし構造物として用いるものであり、すでに現場で利用されその効果が認められつつある。しかし、実用が先行しているものの連結礫工の基本的な特性や機能、合理的な施工法などに関する知識は少なく、特に理論的な研究は皆無の状態である。本論文は、これらの研究背景と現状（1章および2章）を踏まえて、張力伝達を受ける礫群の流水中における力学的平衡という従来の土砂水理学では扱ってこなかった問題にはじめて取り組み、結合2礫の限界掃流力（3章）、群体1層礫の移動限界（4章）、群体多層礫の移動限界（5章）、連結礫工の最適配置法（6章）について明らかにしたものである。

第3章では、ワイヤにより張力が伝達される2個の礫の限界掃流力を、2点間掃流力の相関を考慮した同時確率密度関数と移動限界条件によって評価し、実験によって成立性を検証している。これらにより、結合状態の礫は、単独状態の礫に比してむしろ移動しやすいという非常に興味深い結果を得ている。従来の土砂水理学の知見を拡張するものとなっている。

第4章では、実験に基づいて複数ワイヤを通じて生じる張力の分散という考えを導入し、これを3章の結果に結びつけて複数礫を結合した状態の移動限界条件を求めている。続いて、礫層の透過流れを含む1次元開水路流の数値計算から設置礫層表面に働く剪断力分布を求め、その極大値が現れる下流側天端礫とその上流における結合礫の離脱確率を評価して、張力分散割合の大きな場合ほどその確率が低下することを示している。この結果は、通常の捨石工のようなばら置きの場合に対して連結礫工が高い流失抑制効果をもつ理由を明らかにしたものである。

第5章では、連結された礫が複数層で台形状に設置された場合について解析をおこなっている。はじめに個別礫のばら積み、連結礫工の平積み、および前面覆い積みの3種の実験をおこない、それぞれの破壊過程と限界流量の違いを明らかにしている。続いてポーラスボディモデルによる乱流数値解析をすすめ、流速分布をもとに各ケースの破壊過程の考察をおこなっている。これらによれば、ばら積みの場合には最も流速が高くなる下流面法肩付近から礫が離脱して破壊にいたる。連結礫工平積みの場合には、下流面法肩付近の礫がワイヤ張力で保たれるものの、上流天端の礫がはがれるように流失するため

限界流量があまり大きくなならない。連結礫工の上流面を天端から河床まで覆う形状にすると、移動しやすい天端礫から発生する張力が上流面を覆った礫に有効に分散されるため、流出限界が飛躍的に高くなる。これらは、施工上非常に重要なことがらと、破壊限界の評価法を提案したものであり優れた成果である。

第6章では、連結礫工の最適配置法を提案している。すなわち、ワイヤで繋がれた連結礫工を流れ方向に設置（縦置き）するよりも、横断方向に設置（横置き）する方が移動限界値の向上を見込めることを示している。これは、めくれによって最も流失しやすい上流端礫の張力が、横置きの場合に多数の他の礫に分散されるためである。また、連結礫工の使用数を減らす目的で検討した矩形状の層積みは、前面覆いを施しても流失限界の向上効果が得られないことを示している。このケースでは上流側天端から河床までの距離が短くなり、張力を受け持つ礫数が減ることになるためである。これらの知見は安定性を向上させる設置法を示唆するものであり、有用性に富んだ結果である。

これを要するに著者は、複数の玉石をワイヤなどで房状に結合し構造物として用いる「連結礫工」の流れに対する安定性と流失過程に関し、初めて水理学的・流体力学的な解析をおこない有用性に富む新知見を得たものであり、土砂水理学・河川工学の発展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あるものと認める。