

## 論文の要旨

題目 水路平面形状と透過性抵抗体が跳水・段波機構に与える影響とその数値解析法  
(Experimental investigations and numerical models on the influence of channel planforms and permeable resistance on hydraulic jumps and bores)

氏名 小林大祐

(研究背景と目的)

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、地震によって発生した津波が河川を遡上し越水することで、海岸堤防を越えた津波による被害があまり大きくない地域でも流体力や局所洗掘などによる大きな被害をもたらした。津波が陸地に来襲すると、河口や運河・水路から侵入し、河川や運河・水路に沿って遡上して内陸深くまで進み、流域に被害をもたらすことが知られている。このように、内陸地域における津波による被害を軽減するためには、陸上遡上津波だけでなく、河川遡上津波に対する適切な防災対策が求められる。その防災対策検討のためには、河川遡上津波の非定常流れを適切に解析できる数値計算手法の検証が必要である。東日本大震災やそれ以前にも、1983年日本海中部地震発生時の米代川や2003年十勝沖地震津波における十勝川において津波の河川遡上が観測されている。これまで、河川遡上津波を適切に再現できる数値計算手法の検証は行われ、水位の時間変化や到達時刻について、既存のモデルである平面2次元計算や準3次元計算によって検討されてきた。しかし、大きなエネルギー損失系である津波は局所的な水理条件によって形態が大きく変化するため、水路平面形状や樹木などの透過性抵抗体による河道抵抗と津波現象の相互作用は複雑である。このため、津波の河川遡上特性を明らかにするためには、複雑な現象の相互作用を現象ごとに分類し、段波の基本特性として解明することが求められる。

段波は、伝播速度である波速を導入した Froude 数( $F$ )によって分類され、 $F > 1.7$  の条件で碎波段波、 $F < 1.2$  の条件でソリトン分裂を伴う波状段波が発生することが知られている。河川遡上津波では、底面せん断力に加え河床勾配による重力が作用するため、津波の波速は遡上とともに減衰し、 $F$  は河川縦断方向に変化する。また、河口付近の水深や流速は、地震の大きさや河川や海岸の状況によって異なる。河川遡上津波は  $F$  によって流れ構造やエネルギー損失形態が変化するため、津波の河川遡上特性の把握において重要となる。河川は、様々な形状を有し、樹木群などの透過性抵抗体も多く存在する。このため、異なる段波形態によって、流れ構造への水路形状の影響も異なると考えられる。一般的に、沿岸域における防潮林などの透過性抵抗体は、津波のエネルギーを減衰させることが知られている。しかし、河川を遡上する津波を考えると、沿岸域とは異なり河川堤防により縦断的に防護する必要がある。即ち、河川では、透過性抵抗体によって発生する流体力によって、津波のエネルギーが減衰されると同時に、その反射によって水位が上昇し河川堤防を越水する危険性もある。

段波の  $F$  において波速が 0 の場合、段波の  $F$  は一定の波速で移動する座標系における跳水とみなせる。このため、段波と跳水は本質的には同じ急変流といえる。跳水は、ダムの吐出口から流出する流れのエネルギー消散など、下流の流れによる河床洗掘といった被害を防ぐために流れの

エネルギー消散装置としての役割を持ってきた。また、河川でも堰や落差工といった河川横断構造物の下流で発生し、洪水時には洗掘による河岸侵食などの被害が発生することが知られている。よって、段波と同様に、水路平面形状によって跳水形態やその流れ構造、エネルギー損失形態は変化するため、段波の基本水理特性の解明や解析法の研究においても、跳水機構を明らかにすることは重要である。

#### (本研究の目的と方法)

本研究では、水路平面形状と透過性抵抗体が跳水・段波機構に与える影響を、実験と数値計算を行うことで明らかにし、透過性抵抗体に作用する段波の流体力評価法を検証することを目的とする。第3章では、段落ち部を有する直線・急拡・蛇行水路における潜り噴流と波状跳水の流れ構造と移行限界について、種々の乱流モデルを用いた3次元RANSモデルによる数値計算と基礎実験から明らかにする。第4章では、 $F$ による段波形態と水路平面形状の影響を、実験と平面2次元・3次元計算から明らかにする。第5章では、植生群を通過する段波波高の減衰を評価できる流体力評価法を用いて、平面2次元計算結果と実験結果を比較し、 $F$ による段波の波高・波速減衰特性を明らかにする。

#### (得られた結果と結論)

本研究では、水路平面形状と透過性抵抗体が跳水・段波機構に与える影響を明らかにするために、水路形状変化と透過性抵抗体それぞれにおいて、何に着目して考察するのかを分けて議論をした。水路平面形状と跳水・段波機構においては、水路形状変化に伴うエネルギー損失や流れ構造の変化に着目する。透過性抵抗体と段波機構では、流体力発生に伴う抵抗効果と波高・波速の減衰効果に着目する。さらに、これらの相互作用は $F$ によって変化する跳水・段波形態によって変化する点にも着目する。

跳水形態は、異なる流れ構造とエネルギー損失形態をもつ潜り噴流と波状跳水に分類される。直線水路から急拡水路へと水路形状が変化すると、潜り噴流から波状跳水に移行する条件は、急拡損失によってエネルギー損失が増加するものと、急拡部の高い水位が段落ち流れの突入角度の低下を生じさせるものにより、跳水の移行限界が変化し波状跳水に移行しやすい結果となった。さらに、蛇行水路では潜り噴流に比べ波状跳水の方が、水表面付近に大きな主流速が集中するため、第一種二次流の原因である遠心力が増加し、外岸底面付近に流れが集中することを明らかにした。これは、潜り噴流に比べ危険度が低いとされる波状跳水においても、下流の水路平面形状の変化によって河岸侵食の危険度を生じさせることを示している。

段波形態は、跳水形態と同様に $F$ により形態が分類され、流れ構造や水面形が異なることを明らかにした。碎破段波では、高 $F$ 条件では水路蛇行によって縦断的に流体力抵抗が増加する。これは、高 $F$ 段波の3次元性の強い流速分布において、水路蛇行により主流方向の運動量が底面付近に輸送されるためである。一方、波状段波では、蛇行水路において、無次元幅が大きいほど樹断方向の増幅特性が現れることを示した。これは、水路を伝播する波峰線の側壁への衝突に起因している。波状跳水では外岸沿いの波高増幅がほとんどなく、伝播速度の空間分布をもつ蛇行水路における段波の特徴である。

段波形態によって、透過性抵抗体を通過する場合における波高・波速の減衰特性が異なる。 $F$ が大きい段波であるほど、反射波のエネルギーフラックスが増加し下流に伝わるエネルギーフラ

ックスは小さくなるため、植生通過後の波高や波速は減衰する。また、砕破段波であっても低  $F$  条件であれば、植生内で段波はエネルギー減衰により  $F$  も同様に減衰し、植生通過後にはソリトン分裂が発達した波状段波へと移行する。砕破段波から波状段波に移行する条件は、波形勾配の減少であり、跳水における突入角度と対応する。逆に、砕破段波から波状段波へ移行する条件の  $F$  の減少は、跳水の場合のエネルギー損失が小さいことに対応する。抵抗体による段波のエネルギーフラックスの減少が波状段波へ移行する際の条件となり、結果として波形勾配が小さくなる。

以上により、段波と跳水形態の移行を表す条件を対応させ、両現象を統一的に理解することが出来た。両者の違いは跳水・段波間の伝播特性の有無によって、水路の平面形状等の縦断方向変化の影響の違いに現れる。例えば、水路の曲がりには、伝播速度を持つ波状段波では波高増幅などの外岸の危険性を増加させる一方、伝播速度を持たない波状跳水では二次流を発達させ外岸の侵食危険度を増加させる。そのため、伝播速度の有無が跳水・段波機構に与える影響については、さらなる検討が必要である。また、跳水・段波形態によって、水路平面形状や抵抗体による影響が異なるため、跳水・段波形態の移行について条件として整理し、解析法のベンチマークとすることが重要である。実際の河川遡上津波は縦断的に  $F$  が変化することで、段波形態が変化する。実河川における落差工下流の跳水では、時間的に下流水深や流量が変化することで、跳水形態が変化する。そのため、両者の予測計算には跳水・段波形態の時間的・空間的变化を再現できる実用的な解析法が求められる。