

## 論文の内容の要旨

氏名：佐藤柳言

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：射流の乱流境界層の発達が跳水特性に与える影響

水理学では、開水路流れの水深と速度水頭の和を specific energy（比エネルギー）と呼ぶ。流量が一定で比エネルギーが最小のとき、あるいは比エネルギーが一定で流量が最大の水深・断面平均流速をそれぞれ限界水深・限界流速と呼ぶ。開水路流れにおいて、その水深が限界水深より小さく、その断面平均流速が限界流速より大きいときの流れを射流という。一方、その水深が限界水深より大きく、その断面平均流速が限界流速より小さいときの流れを常流という。工学的には、射流の速度水頭を減少させることを必要とする場合がある。高速水流を制御するための構造物を減勢工 (energy dissipator) と呼び、水理公式集によると、跳水型減勢工、バケット型減勢工、フリップ型減勢工、クッション型減勢工、階段式水路などがある。ここに、跳水とは射流から常流に遷移する際に生じる現象であり、表面渦を伴う跳水は自由跳水 (classical jump) と呼ばれている。跳水型減勢工を用いる場合、水叩きの長さを決定するため、跳水によるエネルギー減勢に必要な流下方向長さおよび底面保護に必要な流下方向長さを知ることが重要である。水叩き部の設計では、跳水長の実験式に基づいて水叩きの長さを決定する場合があるものの、種々の実験式が提案されており、使用する実験式によって跳水長の推定値が異なる。すなわち、跳水型減勢工の水叩きを合理的に決定するためには、跳水の長さや跳水内部のエネルギー収支との関係を明確にして、跳水中でのエネルギー減勢メカニズムの理解を進展させることが重要である。

スルースゲートから流出する射流は、ゲート直下に生じる縮流部では底面極近傍を除いて流速が一樣分布となる。縮流部より下流側では速度勾配の生じる領域、すなわち、乱流境界層が流下とともにその厚さを増し、やがて水面に到達する。開水路不等流の水面形方程式に基づく水面形解析法では、乱流境界層の発達を考慮していないため、水面形の計算値と実測値とに相違が認められる。一方、射流中の乱流境界層の発達を考慮して水深と乱流境界層厚とを解析的に求める方法が 1994 年に提示され、この解析法を用いると水面形の計算値と実測値はよく一致する。しかしながら、乱流境界層が水面に到達した後に射流の乱れが十分発達した状態になるまでの必要流下距離は不明確である。また、乱流境界層の発達を考慮して射流のエネルギー損失を解析的に求める方法は示されていない。

スルースゲート下流側に形成される自由跳水について、1970 年代の実験的研究の成果によると、跳水の始端がゲート直下に位置する場合とゲートから下流側遠方に離れた断面に位置する場合とでは、跳水内部の流速特性および空気混入特性に違いのあることが示されている。また、跳水の長さ、跳水始端・終端の相対水深、底面剪断応力の大きさは、跳水への流入射流の乱流境界層の発達状態によって異なることが報告されている。しかしながら、これらの成果はレイノルズ数の小さい水理模型実験における熱線流速計による計測結果に基づいている。自由跳水は表面渦を伴い空気泡が取り込まれる局所流であるため、熱線流速計による流速の測定精度に検討の余地がある。また、ゲートから離れた断面に跳水始端が位置する場合の跳水については、流入射流の乱流境界層の発達状態が明確にされていない。すなわち、跳水への流入射流の乱流境界層発達状態を考慮し、跳水内部の流速と乱れ強さの特性を解明するためのさらなる研究が必要である。

本研究は、長方形断面水平水路のスルースゲートから流出する射流の乱流境界層の発達と跳水の水理特性に与える影響を明らかにしたものである。エネルギー消散厚を用いて乱流境界層発達中の射流のエネルギー損失を解析的に求める方法を導出し、この方法の実験的検証を行った。乱流境界層が水面に到達した断面より下流側の射流について、射流の水面変動が十分に大きくなる断面では、射流の流速と乱れ強さの特性が開水路等流の場合と同程度になることを示した。すなわち、射流の乱れが十分発達した状態になるまでの必要流下距離を明らかにした。これらの検討より、スルースゲートから流出する射流を乱流境界層が未発達の状態、発達中の状態、十分発達した状態の 3 つに区分した。この成果を用いることによって、跳水への流入射流の乱流境界層の発達状態が明確にされた。跳水への流入射流の乱流境界層が未発達の状態と十分発達した状態の跳水を対象に、跳水内部の流速と乱れ

強さを詳細に測定した結果を示した。跳水を検査領域に選びエネルギー方程式を適用し、跳水始端断面から任意な下流側断面までの流下距離と跳水内部のエネルギー収支との関係を説明した。これらの結果を用いて跳水内部のエネルギー収支が明らかにされた。これより、エネルギー減勢構造物での跳水長の合理的な物理的意味は、跳水によるエネルギー損失が達成されるための必要長さであることを再確認した。以上より、跳水への流入射流の乱流境界層の発達状態を考慮し、跳水によるエネルギー減勢の物理的機構に注目して、跳水型減勢工の水叩長を合理的に決定することが可能になった。

本論文は、全4章で構成されている。各章の内容を要約すると次のとおりである。

第1章「序論」では、研究背景と本研究の目的を記した。跳水型減勢工の水叩き部で射流の速度水頭を減少させるため、水叩長を合理的に決定する必要があることを述べた。また、射流の乱流境界層の発達を考慮して、スルースゲート下流側の射流および跳水の水理特性を解明する重要性を述べた。これらの背景のもと、本研究の目的を示した。

第2章「スルースゲートから流出する射流の乱流境界層の発達」では、長方形断面水平水路のスルースゲート下流側の射流を対象に、解析的・実験的検討を行った成果を示した。

乱流境界層発達中の流れについては、境界層近似されたレイノルズ方程式を用いて、平板上の空気流の場合で導出されているカルマンの運動量積分方程式と同じ結果が水平開水路流の場合にも得られることを明示した。また、エネルギー方程式を乱流境界層に適用してエネルギー消散厚を導入し、乱流境界層の発達を考慮して射流のエネルギー損失を解析的に求める方法を導出した。乱流境界層内の流速分布を実験で確認して乱流境界層厚の間接測定値を求め、乱流境界層の発達状況・水面形・エネルギー損失の解析方法に対して、実験的検証を行った。これらより、ゲート下流側の射流の乱流境界層の発達状況と水面形の解析方法を発展させた。

高速度ビデオカメラによる射流水面の流況観察と超音波水位計による水面変動の測定結果とを併用し、射流の水面に生じる凹凸と変動を定性的かつ定量的に示した。乱流境界層の発達とともに、射流の水面に生じる凹凸と変動は大きくなり、射流中の乱れ強さの大きい領域は底面付近から水面に向かって広がっていることを示した。乱流境界層が水面に到達した断面より下流側の流れについては、射流の水面変動が十分に大きくなる断面では、射流の流速と乱れ強さの特性とが開水路乱流で等流の場合と同様になることを見出した。

これらの解析的かつ実験的検討より、長方形断面水平水路のスルースゲート下流側の射流を乱流境界層が①未発達の状態(undeveloped flow)；②発達中の状態(developing flow)；③十分発達した状態(fully developed flow)の3つに区分した。

第3章「流入射流の境界層発達状態による跳水特性の変化」では、第2章で示された射流の乱流境界層の発達状況と水面形の解析方法を用いて跳水への流入射流の乱流境界層発達状態を系統的に変化させ、跳水内部の流速を詳細に測定した結果を示した。

スルースゲート下流側に形成される跳水について、縮流部の断面に跳水始端が位置する場合は undeveloped inflow condition の跳水と呼ばれている。また、乱流境界層が水面に到達した断面より下流側の射流に跳水始端が位置する場合は fully developed inflow condition の跳水と呼ばれている。実験的検討によって、undeveloped inflow condition の跳水と fully developed inflow condition の跳水とでは、跳水の流速特性・乱れ強さ特性・底面摩擦抵抗係数の大きさに違いの生じることを明確にした。Fully developed inflow condition の跳水のほうが undeveloped inflow condition の跳水よりも跳水内部の主流は短区間で広がりながら水面に向かって上昇することが示された。また、fully developed inflow condition の跳水のほうが undeveloped inflow condition の跳水よりも流下方向の乱れ強さの大きい領域は底面から離れた位置に形成されていることが示された。

跳水部にエネルギー方程式を適用し、跳水始端断面から任意な下流側断面までの流下距離と跳水内部のエネルギー収支との関係を説明した。跳水内部の流速と乱れ強さの結果に基づいて跳水内部のエネルギー収支を明らかにし、エネルギー減勢構造物での跳水長の合理的な物理的意味は、跳水によるエネルギー損失が達成されるために必要な長さであることを再確認した。跳水によるエネルギー損失の達成されている断面では、跳水内部の最大流速は十分に減衰し、最大流速は底面から離れて水面付

近に向かっており、底面摩擦抵抗係数は十分に小さくなっていることを確認した。すなわち、跳水によるエネルギー損失が達成されるために必要な長さは、底面保護に必要な水平長さに対応していることが示された。これによって、水平水叩きの合理的設計に有用な跳水長の実験式を確認した。

第4章「結論」では、本研究の成果を要約した。すなわち、乱流境界層の発達を考慮して射流および跳水の水理特性を解明したことは、開水路流れの水理学の発展に貢献するという本研究成果の学術的な価値を述べた。また、跳水内部のエネルギー収支を明らかにしてエネルギー減勢構造物における跳水長の合理的な物理的意味を再確認したことは、跳水型減勢工の水工設計法を向上させるものであるという工学的な価値を述べた。