

論文審査の結果の要旨

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生じる現象が跳水特性に与える影響

審査委員：（主査） 教授 高橋 正行

（副査） 教授 安田 陽一 教授 後藤 浩

名誉教授 大津 岩夫

高速水流を制御するための構造物を減勢工と呼び、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、階段式水路のように分類がなされている。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る。跳水型減勢工の水叩きの長さを合理的に決定することが必要であり、跳水の長さや跳水内部の物理的機構との関係を明確にす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、ゲート直下で流速がほぼ一様分布の縮流部となる。縮流部より下流側では速度勾配が生じる領域、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。乱流境界層の発達を考慮していない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、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。

申請者の論文では、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が生じる現象が跳水の水理特性に与える影響を示している。すなわち、スルースゲート下流側の射流を対象に、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用い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、その方法の実験的検証が行われている。また、乱流境界層が水面に到達した断面より下流側の流れについて、流速と乱れの特性とが開水路等流と同様になる流下距離を示している。さらに、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、始端断面が縮流部に位置する跳水と始端断面の射流の乱流境界層が十分に発達した跳水とでは、定常跳水の流速特性・乱れ強さ特性・底面摩擦抵抗係数の大きさに違いが生じることを明確にしている。エネルギー方程式を跳水部に適用し、跳水内部のエネルギー収支と跳水長の関係式を示し、エネルギー損失と跳水長との関係を実験的に明らかにされている。これらによって、減勢工の流下方向長さを合理的に決めることが可能となることを示している。

本論文は、全4章で構成されている。

第1章「序論」では、研究背景として、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、合理的に水叩長を決定することの必要性について文献を適切に引用し、本研究の必要性・有用性を明確にしている。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と工学的意義とが明確に示されている。すなわち、既存研究を含めて現状と課題を整理し、本研究の目的は良好に整理されている。

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、解析的検討と系統的な実験的検討を行った成果が示されている。

乱流境界層発達中の流れについては、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することに成功している。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、実験的検証が行われている。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ている。

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が定性的かつ定量的に示されている。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が実験的に明確に示されている。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、流下方向距離の大きさに関わらず水面変動の値が一定になると、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が実験的に明らかにされた。

これらの検討よって、長方形断面水平水路のスルースゲート下流側の射流の状態について、①乱流境界層が未発達の状態(undeveloped flow)；②乱流境界層が発達中の状態(developing flow)；③乱流境界層が水深方向に発達し射流の乱れが十分発達した状態(fully developed flow)の3つに区分された。以上の成果は、従来の研究にはない新規性と工学的有用性が認められる。

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結果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ている。

スルースゲート下流側に形成される跳水については、undeveloped inflow conditionの跳水（縮流部の断面に跳水始端が位置する場合）とfully developed inflow conditionの跳水（乱流境界層が水面に到達した断面より下流側で、乱れが十分に発達した射流に跳水始端が位置する場合）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が生じることが系統的な実験的検討によって明確にされた。すなわち、fully developed inflow conditionの跳水の方が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、fully developed inflow conditionの跳水の方が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が説明された。また、跳水内部の流速と乱れ強さの測定結果に基づいて跳水内部のエネルギー収支が明らかにされている。この結果、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が確認された。すなわち、跳水によるエネルギー損失の達成されている断面では、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実証した。以上より、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、河床や水路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ている。

跳水内部の流速と乱れ強さを詳細に計測することで、跳水内部のエネルギー収支を明確にしたことは独創的であり、水理学分野の学問の発展に寄与する研究成果であることが認められる。流入射流の乱流境界層の発達状態によって、跳水内部の流速特性・乱れ特性・底面摩擦抵抗係数の大きさに違いが生じることが定量的に示された。これによって、高速水流のエネルギー減勢完了長の合理的決定が可能になり、工学的有用性の認められる成果が得られている。

第4章「結論」では、本研究の成果が明確に示されている。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ことが示されている。跳水内部のエネルギー収支を明らかにして跳水長の合理的な物理的意味を確認したことは、跳水型減勢工の水工設計法を向上させるものであり、工学的有用性が明確に示されている。

申請者の論文は、跳水の水理特性に対して射流の乱流境界層発達状態が影響していることを系統的研究によって明確にしているため、水理学の発展に貢献する独創性と有用性とを有するものであることが認められる。このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するために必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和6年2月15日