

氏 名	石 井 義 裕
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 4 年 3 月 27 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学 位 論 文 題 目	開水路における乱流構造と自由水面の力学的役割 に関する基礎的研究
指 導 教 官	東北大学教授 澤本 正樹
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 澤本 正樹      東北大学教授 首藤 伸夫 東北大学教授 柳澤 栄司      東北大学助教授 石川 忠晴

## 論 文 内 容 要 旨

私達の周囲には様々な流れが存在しているが、大別すると2種類の流れになる。一つはパイプ内の気体や血管中の血液のように、液体が周囲から壁面で囲まれており管全体に流体が満たされている流れ（閉管路）であり、もう一つは河川を流れる水のように流体の周囲が壁面と自由水面と接している流れ（開水路）である。この開水路流れを最も特徴付けることは、自由水面が存在していることである。

閉管路については従来より多くの研究が行われており、流れの構造は明らかになりつつある。開水路については、内層および自由水面付近を除く外層の乱流構造は明らかになりつつあるが、自由水面付近の乱流構造は測定の高難しさのため、あまり多く研究が行われていない。そのため流れの流速や乱流特性を議論する場合には、従来では平均流速分布や乱れ強度の類似性から自由水面付近を除けば水深の2倍の流路をもつ閉管路として便宜的に扱うことができる、すなわち自由水面は閉管路における管路の中心に相当すると考えられてきた。

しかし、自由水面は単にせん断力ゼロの境界であるばかりではなく、大規模な乱流構造を制約したり、波動としてのエネルギー伝搬性を有するなどの力学的役割をもっている。そのため管路の中心における流れの対称条件を自由水面の境界条件として用いることは不適切であり、自由水面の力学的特徴を考慮した境界条件を用いる必要がある。

本研究は実験的手法を用い自由水面の力学的役割の基礎的部分を明らかにし、数値計算において

自由水面の境界条件の適用性について検討を行った結果をまとめてものであり、全編6章より構成されている。

## 第1章 序 論

本章は序論であり開水路乱流、渦対の挙動、数値解析に関する従来の研究など本研究に関する関連する事項について述べて後、本研究の背景と目的について述べている。

## 第2章 開水路および閉管路の乱流構造の比較

本章では、開水路の基本的な特徴を実験的に明らかにしている。まず、基本的な流れである等流の場合についてレーザドップラ流速計を用いて平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力等の分布を調べた。次に、自由水面の影響を顕著に示す一例として等流に円柱を鉛直に設置し、この円柱の後流を重ね合せた場合と等流の場合とを比較検討した。さらにVTRと画像処理システムを用いて流れの中で生じている大規模な乱流の組織構造を捉え、自由水面が乱流構造に与える力学的役割について開水路と閉管路を比較した。

その結果、等流の場合には開水路と閉管路とでは流速分布および乱れ強度分布において以下のような相違がみられることが分かった。等流状態では閉管路では管中央で流速勾配がゼロになっているが、開水路では流速分布が底面から対数則にしたがって自由水面に達している。これは開水路では底面からのみ流速分布が決められていくためである考えられる。また、開水路は閉管路に比べ自由水面の乱れ強度 ( $u'u'$ ) が大きくなっており、自由水面付近での乱れの非等方性が強まっている。

さらに、自由水面の擾乱の影響を顕著に表わす例として行った等流に円柱の後流を重ね合わせた実験では、閉管路では乱れ強度は高さ方向に一様に乱れており後流の影響を表わしているが、開水路では円柱からの距離が大きくなるにつれて壁面乱流が発達し後流の影響が打ち消されていることが分かった。

可視化による開水路と閉管路の比較では大規模組織構造に相違がみられた。閉管路では上下の壁面から生じた大規模組織構造は管軸中心付近までは自由に成長しているが、管軸中央付近では互いに影響しあって流れ構造を支配している。これに対し開水路では、底面で発生した大規模組織構造は自由水面まで自由に成長しており、いわゆる流れの対称条件に相当することは成立しないことが分かった。

## 第3章 自由水面に衝突する渦対による乱流構造の特性

本章では、第2章で観察された水流中で生じている底面から上昇している大規模組織構造をモデル実験で調べている。大規模組織構造が自由水面に衝突するという現象を2次元の渦対が自由水面に衝突する現象で模擬し、それを固定壁に衝突する場合と比較することにより、大規模組織構造について考察した。渦対の衝突による自由水面の乱流構造は中立浮子を用いた可視化を利用した流速測定手法を用い、流速場および力学的エネルギー場の評価を行っている。

その結果、自由水面が境界である場合には、固定壁が境界である場合に比較して以下に示すよう

な相違があることが分かった。

固定壁が境界の場合には境界が変形することがないため、渦対が固定壁に衝突するときに固定壁の圧力が上昇し、渦対は分離し固定壁に沿って移動する。固定壁に衝突した渦対は渦の中心の回りに集中的に分布している。一方、自由水面が境界の場合には、境界が柔軟に変形するために渦対が衝突することにより水面が上昇する。その後、水面上昇部の周囲の変動は乱れとしての性質と波動としての性質を併せ持つようになる。自由水面に衝突した渦対は水表面の降下に伴って斜め下方に進行し、広い範囲に渦度が分布するようになる。

また、自由水面が境界の場合には、渦のエネルギーが水位の変動と波動としての変動に転換しているものと考えられる。自由水面の位置エネルギーと固定壁の圧力エネルギーを比較すると、位置エネルギーは圧力エネルギーの約80%に相当していることが分かった。この自由水面の位置エネルギーと固定壁の圧力エネルギーとのエネルギーの差が波動としてのエネルギーに相当するものと考えられる。したがって、自由水面の境界条件としては渦エネルギーが波動エネルギーに転換する量を考慮する必要がある。

#### 第4章 水面に擾乱を加えた開水路の乱流特性の比較

本章では、底面から生じた大規模な上昇流が自由水面に衝突し、波動として伝播する現象に着目した。そこで水面に強制的に擾乱を与えるという簡単な実験を行ない、水面に与えた擾乱によって開水路の乱流構造にどのような影響を与えるかについて検討した。計測にはレーザドップラ流速計を用いて、まず等流の乱流特性を調べ、次に水面に擾乱を重ね合わせた場合について調べた。さらに擾乱を重ね合わせた流速成分を抽出することにより、波動成分の乱流構造に与える影響について調べた。その結果、以下のことが分かった。擾乱を重ね合わせた開水路の場合、水位が上昇する位相では高速流体が入出するため流速勾配が大きくなり、乱れ強度・レイノルズ応力が増加している。擾乱成分を抽出した結果、乱れ強度のうち擾乱成分は擾乱と流れによる乱れ強度に対し水平方向の乱れ強度では底面付近で約20%、水面付近で約50%の割合となっており、鉛直方向の乱れ強度では約50%程度の割合を占めている。また、擾乱を与えた場合の流速の相関関係を調べた結果、水面付近 ( $Y/L > 0.3$ ,  $Y$ : 底面からの高さ,  $L$ : 擾乱部の波長) では水粒子は円運動をしており波長成分を表わしているが、底面付近では流れのみの場合と同様の運動を示している。

したがって、水面に与えた擾乱は水面付近では乱流構造に影響を与えているが、流れの場全体としては壁面乱流の影響の方が強くあらわれており、自由水面の変動による乱流場に与える影響は小さいものと考えられる。

#### 第5章 自由水面付近の乱流構造を考慮した自由水面の境界条件

本章では乱流モデルとして  $k-\epsilon$  モデルを用いた数値計算を行った。第2章で計測した平均流速、レイノルズ応力、乱れエネルギーおよび散逸率などの代表的な乱流統計量について計算値とを比較し、自由水面での境界条件の適用性について検討した。自由水面の境界条件としては、従来用いられてきた対称性を考慮した「管中央での対称条件」と、「渦度の輸送のない条件」とを用いて計算

を行ない、出来るだけ少ないパラメータと簡単な考え方を用いることで、適切な自由水面のモデルを提案することを目的とした。

その結果、 $k-\varepsilon$ モデルを用いた計算において以下のことが明らかになった。閉管路においては管中央での対称条件を境界条件として用いることによって平均流速分布、乱れエネルギー分布および散逸率分布において実験値を再現することができた。開水路では同様の対称条件を用いると、平均流速分布では自由水面付近で、乱れエネルギー分布および散逸率分布では  $y/h_0 > 0.5$  ( $y$ : 底面からの高さ,  $h_0$ : 水深) で実験値と異なる。一方、渦度の輸送のない条件を用いると、流速分布、乱れエネルギー分布および散逸率分布でも実験値をよく再現することができた。

## 第6章 結 論

本章では本研究で得られた結果をまとめて結論とした。

## 審査結果の要旨

開水路流れの乱流は、底面からの影響で決定される壁面乱流としての特性と自由水面における波動伝播性との相互作用が共存し、複雑な力学特性を有している。本論文は、開水路乱流に対する自由水面の力学的役割を実験的に調べた結果をまとめ、さらに乱流モデルへの適用を考察したものであり、全6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的とを説明している。

第2章では、水流の基本的流れである等流と、等流中の置かれた円柱の後流とについて、レーザードップラー流速計を用いた乱流測定と流れの可視化実験を行い、自由水面の存在する場合と、閉管路の場合とを比較している。その結果、開水路流では大規模な乱流構造が自由水面で制約されること、開水路流の後流では壁面乱流の回復が速いことなどが確認された。これは新しい知見である。

第3章では、大規模乱流運動に模擬した渦対を自由水面と固定壁とに衝突させる比較実験を行い、それらの力学的エネルギーの挙動を明らかにしている。これにより、固定壁は通常の鏡像効果があるのに対し、自由水面では渦運動のエネルギーの一部が波動エネルギーに変換されて伝播していくことが定量的に示されている。これは重要な知見である。

第4章では開水路乱流場の水面に強制的に擾乱を加えた場合の乱流特性を実験的に調べている。その結果、水面の擾乱は表面波成分として流れ場に重畳し計測結果に影響を与えるが、乱流特性は底面からの影響が支配的であり、自由水面は乱流特性に関しては受動的であることが示されている。

第5章では、自由水面が存在する場に乱流モデルを適用する場合の水面での境界条件について調べている。その結果、従来の各種水理量を水面で対称とする境界条件をそのまま自由水面に適用すると、閉管路流は精度よく再現されるが開水路流では水面近くで実験値を説明できなくなることを示し、さらに開水路流を精度よく計算するための自由水面での新しい境界条件を提案している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、自由水面が存在する場における壁面乱流の特性を、実験とモデル解析により明らかにしたもので、流体力学とりわけ開水路水理学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。