

京都大学	博士 (工学)	氏名	Puay How Tion
論文題目	Fundamental Characteristics of Fluidable Material Dam Break Flow with Finite Extent and Its Application (流動性材料を用いた有限領域のダム破壊流れの基本特性とその応用に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、水理学で取り扱う有限領域のダム破壊流れ、開水路急拡部の高速流など、水深がゼロである水際線の時間的、空間的移動を伴う流れ場の基本的特性について理論的、数値解析的に考察を行い、水だけでなくフレッシュコンクリートなど流動性材料の流動特性を明らかにするとともに、材料のレオロジー的物性値評価法を含む実際的応用について検討したものであり、8章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究課題を取り上げた動機と研究の目的、並びに論文の構成について記述している。</p> <p>非粘性流体の有限領域ダム破壊流れは、ニュートン流体や非ニュートン流体の流動初期の特性を表現していると考えられるため、第2章では、まず非粘性流体に対して水深積分モデルを用いた場合の近似解を導いている。まず、水深と流速の流れ方向分布の相似性を仮定した相似理論を適用すると非現実的な結果になることが知られていることから、流れ方向分布に相似性を仮定せず、原点を中心としたべき乗展開法により水深、流速の時空間分布に関する近似解を導いた。この近似解は水深に関して空間方向に一様で、原点において時間の-1乗で減衰するという特性を有する。検証のため水深積分モデルの数値解析結果と近似解を比較したところ、十分時間が経過した後で数値解析結果は時間の-1乗で減衰するようになるが、近似解の適合性は十分でなく、水深の空間分布も原点近傍のみで成立する非現実的な一様分布であることから、別の手法により解を導く必要性が指摘された。</p> <p>そこでこれらの結果を踏まえて、時空間平面での特性曲線網の構造を考慮することによって、流れの全域で適用可能となる近似解の導出を行った。瞬間的に取り除かれた隔壁の位置から射出する負の特性曲線は壁に到達した後反射する。基礎式をこの壁で反射した特性曲線の位置と原点間で規格化した移動座標系での基礎式に変換すると、特性曲線上でフルード数が1になることを示した。移動座標系では壁とこの特性曲線間の流れが常流(フルード数が1未満の流れ)になることが保証される。そこで、この間で水深、流速の近似解を時空間のべき級数展開として表し、移動座標系での基礎式に代入後、境界条件を考慮することで級数展開の係数を定めた。壁位置での水深の時間的低減率や空間分布形について近似解と数値解析結果を比較することで、導かれた近似解が十分よい精度をもつことを示した。</p> <p>ニュートン流体、非ニュートン流体の有限領域ダム破壊流れにおいては、流動の初期に2章で考察した慣性・圧力領域が現われ、その後粘性の影響が卓越する粘性・圧力領域に移行すると考えられる。そこで第3章では、非ニュートン流体に対して相似理論を適用し、粘性・圧力領域の先端位置と水深の時間的減衰に関するべき乗則を導くとともに、粒子法を適用した鉛直2次元数値解析結果を用いて、慣性・圧力領域から粘性・圧力領域への移行とべき乗則が成立する領域の存在を検証した。</p> <p>第4章では、慣性・圧力領域から後続の粘性・圧力領域への移行を統一して再現できる実用的方法として、水深積分モデルの基礎式を壁から先端位置まで積分する空間積分モデルを提案した。その際、連続式と運動方程式だけでなく、エネルギー式も連立することで関係式</p>			

氏名	Puay How Tion
----	---------------

の数不足の問題を解消する方法を提案した。得られた非線形連立常微分方程式に含まれる積分定数を適切に評価して数値解析を行った結果、空間積分モデルを用いて流動初期から終局状態までの領域の移行、及び理論的に導かれた各領域のべき乗則を再現することが可能であることを示した。ここまでの結果から、非ニュートン流体を用いた有限領域ダム破壊流れの実験結果と空間積分モデルの数値計算結果を比較することにより、構成則のべき乗と粘性係数の値を同定することが可能であることを指摘した。

第5章では、以後の章で用いられるVOF・CIP法に基づく多次元数値解析法の概要をまとめた後、単純な場での実験結果との比較や体積保存性等のベンチマーク・テストの結果を示した。

第6章では、これまでの知見に基づいてフレッシュコンクリートのスランプフロー試験に関する考察を行った。フレッシュコンクリートはビンガム流体で近似できると考えられており、フレッシュコンクリートの流動性試験であるスランプフロー試験はビンガム流体を用いた有限領域ダム破壊流れとみなすことができる。ビンガム流体のレオロジー物性値は降伏応力と塑性粘度の二つで構成される。降伏応力が小さく粘性が卓越する場合、初期からある程度時間が経過するまで、慣性・圧力領域から粘性・圧力領域に移行する粘性流体の流動則を適用することが可能で、その後、降伏応力が卓越するようになって静止すると考えられる。一方、降伏応力が大きい場合、粘性領域が出現しないまま慣性・圧力領域から降伏応力卓越領域に移行すると考えられる。このような考察のもとで、降伏応力や塑性粘度を変化させながら、スランプフロー試験の鉛直2次元数値解析を実施し解析結果の考察を行った。解析結果はスランプフロー試験の結果をほぼ再現しており、レオロジー物性値の組み合わせによって上述の典型的な流動パターンが存在することを確認した。これらの結果から、流動の時間発展をレオロジー物性値で構成される無次元量を用いて整理することにより、降伏応力と塑性粘度を同定することが可能であることを指摘した。

第7章では、水際線が移動するダム破壊流れと類似の現象として、急勾配開水路の急拡部下流の流れを取り上げ、流動の基本特性を検討した。急勾配開水路の急拡部下流の流れは、ダム破壊流れの慣性・圧力領域に対応する急拡部直下流の流れと、粘性・圧力領域に対応するある程度下流部の流れに分類される。ただし、急拡部直下流で生じる水際線が側壁に到達し斜め衝撃波が発生する場合については別途取り扱う必要がある。本研究では主として急拡部直下流の流れを考え、VOF・CIP法を適用した3次元数値解析を実施した。解析結果と水理実験結果を比較することで、水際線の伝播、水路中心軸における水深の低減特性、斜め衝撃波の発生・伝播が精度よく再現されていることを検証した。また、水際線の伝播については、特性曲線理論から導かれる拡がり角度とフルード数の関係に関する理論式と数値解析結果、水理実験結果がよく適合していることを検証した。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、水理学で取り扱う有限領域のダム破壊流れ、開水路急拡部の高速流など、水深がゼロである水際線の時間的、空間的移動を伴う流れ場の基本的流動特性について理論的、数値解析的に研究した成果をまとめたものであり、得られた主な結果は次のとおりである。

1. 非粘性流体における有限領域ダム破壊流れの基本特性を考察するために、浅水流方程式に基づいた解析解を導いた。瞬間的に取り除かれた隔壁の位置から射出する特性曲線は壁に到達した後反射する。本研究では、基礎式を壁で反射した特性曲線と共に移動する座標系に変換すると、この特性曲線上でフルード数が1になることを示した。さらに、移動座標系上で常流(フルード数が1未満の流れ)になるこの特性曲線と壁の間において、水深、流速の時間・空間分布に関するべき級数解を導くと共に、壁位置での水深の時間的低減率、先端位置と時間の関係を導いた。

2. ニュートン流体、非ニュートン流体の有限領域ダム破壊流れにおいては、流動の初期に上記の慣性・圧力領域が出現し、その後粘性の影響が卓越する粘性・圧力領域に移行すると考えられる。非ニュートン流体における粘性・圧力領域の先端位置と水深減衰に関するべき乗則を導くとともに、VOF・CIP法を適用した鉛直2次元数値解析を実施することで、慣性・圧力領域から粘性・圧力領域への移行とべき乗則の領域の存在を検証した。次に、初期から終局状態までの領域の移行を統一して再現する方法として、水深積分モデルの基礎式を壁から先端位置まで積分する空間積分モデルを提案した。その際、エネルギー式を連立することで関係式の不足を補う方法を提案している。得られた非線形連立常微分方程式に含まれる積分定数を適切に評価して数値解析を行った結果、空間積分モデルを用いて領域の移行や理論的に導かれた流動のべき乗則を再現することができることを示した。

3. これまでに得られた結果をスランプフロー試験に適用した。フレッシュコンクリートのスランプフロー試験はビンガム流体の有限領域ダム破壊流れと考えることができる。従来の試験結果とVOF・CIP法を用いた数値解析結果の考察から、無次元降伏値と無次元塑性粘度の大きさにより、流動には典型的な二パターンが存在し、塑性粘度が小さい場合、慣性・圧力領域から粘性・圧力領域への移行が存在するが、降伏値が大きい場合崩壊過程から直ちに停止過程に入ることを示した。これらの流動パターンを無次元パラメータにより整理することで、物性値の評価が可能となることを指摘している。

4. 水際線が移動するダム破壊流れと類似の現象として、急勾配開水路の急拡部下流の流れを取り上げ、流動の基本特性を検討した。急勾配開水路の急拡部下流の流れは、ダム破壊流れの慣性・圧力領域に対応する急拡部直下流の流れと、粘性・圧力領域に対応するある程度下流部の流れに分類される。本研究では主として急拡部直下流の流れを考え、VOF・CIP法を適用した3次元数値解析を実施した。解析結果と水理実験結果を比較することで、水際線の伝播、水路中心軸における水深の低減特性、斜め衝撃波の発生・伝播が精度よく再現されていることを検証した。

要するに本論文は、有限領域のダム破壊流れ、開水路急拡部の高速流など、水深がゼロである水際線の時間的、空間的移動を伴う流れ場の基本的流動特性について理論的、数値解析的に研究するとともに実用的な応用について検討したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年2月4日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。