

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	有本 慎一
論文題目	Numerical method for coupled analysis of Navier-Stokes and Darcy flows (ナビエストークス流れとダルシー流れに対する連成解析のための数値解析手法)		
(論文内容の要旨)			
<p>土のような多孔質体中の浸透流と、流体のみで占められた領域（以下、「流体領域」と呼ぶ）における流れを同時かつ連続的に解くことは、ため池堤体や堤防の内部侵食について土と流体が接触するメカニズムを明らかにする上で有用な手段となる。本論文では、多孔質体／流体領域の両者を含む流れの連成解析において安定的な数値解を得るための手法を提案する。</p> <p>本論文は全6章から成る。第1、2章では、本論文の目的、既往研究について述べた後、上記の連成解析を実現するための支配方程式とその離散化を示した。第3章においては、提案手法によって得られる数値解の妥当性と安定性を検証し、第4、5章では、多孔質体中の浸透流と流体領域の流れの連成解析により、それら二つの流れが互いに及ぼす影響について、レイノルズ数とダルシー数の二つの無次元量を変えて考察した。具体的には、第4章で多孔質領域を有するバックステップ流れを、第5章で空洞を有する浸透流を、それぞれ取り扱った。最後に第6章において、本論文の結論とともに将来展望を述べた。本論文の内容を要約すれば、以下のようなものである。</p>			
<ol style="list-style-type: none">1. 多孔質体中の浸透流と、流体領域の流れを同時かつ連続的に解くためには、性質の異なるこれら二つの流れを記述する支配方程式とともに、その安定的な数値解法が求められる。一般的に、流体領域にはナビエストークス式、多孔質体領域には連続的にダルシー則を適用した方程式が利用される。しかし、この組み合わせでは多孔質体と流体領域の境界において、圧力と流速を連続的に接続することができず、質量保存則を満たすことが困難となる。そこで本論文では、多孔質体領域における流れの支配方程式としてDarcy-Brinkman式を採用した。同方程式では、圧力と流速が独立に定義されるため、流体領域と多孔質領域の境界において、圧力および流速を連続的に接続し、質量保存則を厳密に満たしながら両領域の流れが解析可能となる。また、Darcy-Brinkman式は流体領域においてナビエストークス式に一致するため、一つの方程式によって二つの領域の流れを解析できる。数値解析手法には、FVM (Finite Volume Method、有限体積法) をベースとし、多孔質体／流体領域との境界において、急激な流れの変化から生じる圧力と流速の数値振動を回避できる計算手法を提案した。2. 上記の手法により得られる数値解の妥当性と安定性を示すため、いくつかのベンチマーク問題の数値計算に取り組んだ。解析領域が流体領域のみで構成された場合では、キャビティ流れとバックステップ流れの計算結果が、既往研究の報告と一致することを確認した（キャビティ流れは四方を壁で囲まれた正方形領域に形成される渦の計算、バックステップ流れは段差を通り過ぎる流れの剥離と再付着を対象とするベンチマーク問題）。解析領域に流体領域だけでなく多孔質領域を含む問題として、一次元浸透問題、下部に多孔質領域を有するキャビティ流れの計算を行った。前者では、流体領域から多孔質体に流れ込む一次元問題を対象とすることで、両領域の境界において提案手法が圧力と流速の数値振動を発生させないことに加え、数値解が質量保存を満足した上で解析解と一致すること			

が示された。後者は両領域を有する二次元の検証問題として採用した。その結果から、多孔質体／流体領域の境界において連続的な流速と圧力の分布が計算され、下部に多孔質領域が存在することにより流体領域に形成される渦が下流側に少し移動すること、また多孔質体では、流体領域に形成される渦の中心に向かって湧き上がる流れが計算されることを示した。これは、両領域の連成計算において地盤工学分野で初めて示された計算結果である。

3. 下部に多孔質体を有するキャビティ流れの計算から見られるように、両領域の流れが互いに影響を及ぼし合うことで流況が変化する。この変化を定量的に調べるため、Darcy-Brinkman式に関する無次元数であるレイノルズ数とダルシー数（レイノルズ数は流体領域、ダルシー数は多孔質体中の流れに関する無次元量）を変化させ、多孔質体の段差を有するバックステップ流れを対象として、両領域の流れが流況に及ぼす影響を調べた。ダルシー数を一定に保ち、レイノルズ数を増加させると、境界面付近の多孔質体内の流速が増加し、再付着点の位置が段差から遠ざかる結果を得た。しかし、レイノルズ数の増加に対する再付着点の変化は、通常の（段差が多孔質体ではない）バックステップ流れとほぼ同様となった。これは、多孔質体内の流速の変化量が、流体領域の流速に比べて非常に小さいためと考えられる。一方、レイノルズ数を一定に保ち、ダルシー数を変化させた場合は、再付着点の位置はダルシー数が 10^{-3} のオーダーになると10%程度増加することが明らかとなった。この結果は、バックステップ流れにおいて、再付着点の位置は主にレイノルズ数によって支配され、ダルシー数の影響（多孔質体中の浸透流の影響）は大きくても10%程度であることを示した。
4. 提案手法の応用の一つに、空洞を有する多孔質体の浸透挙動を精緻に予測することが挙げられる。そのための基本的な予測計算として、四角形の空洞を有する浸透挙動をレイノルズ数、ダルシー数、空洞形状のアスペクト比を変化させて考察した。その結果、レイノルズ数は空洞中の流速の大きさに影響を及ぼすが、全体的な流れの変化についてはダルシー数と空洞形状の変化が支配的であることが明らかとなった。具体的には、空洞形状が浸透流の主流方向に短い場合、空洞内には壁面に沿った2つの集中流が形成されるのに対し、空洞形状が浸透流の主流方向に長い場合には、空洞中央部に流れが集中することで空洞内にも一つの主流が形成される結果を得た。また、ダルシー数の影響としては、その値が大きくなるにつれて、空洞中の流速が小さくなることが示された。これは、ダルシー数の増加は、多孔質体の透水性が大きくなることを意味し、空洞の透水性が相対的に小さくなるためと考えられた。

以上のように、本論文はDarcy-Brinkman式を用いて、従来困難があった多孔質体／流体領域における流れの連成解析手法を提案した。提案手法の特徴は、両領域の境界において圧力と流速を連続的に接続し、質量保存則を満たしつつ、その境界で生じる数値振動を回避できる点にある。提案手法は従来不明であった両領域の精緻な流れの計算を可能にしており、土と水のように多孔質体と流体が接する幅広い水理的な問題を正確に扱うことのできる解析手段となることが期待される。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、多孔質体／流体領域における流れの連成計算を実現する解析手法を提案し、提案手法によって得られる数値解の精度検証と応用計算例を示した。その背景として、土質材料で構成された農業水利施設では、貯水に起因する侵食や空洞化による劣化・損傷の可能性を避けることができないことが挙げられる。本論文は、このような土構造物に対する新たな連成解析の展開に寄与する基礎的研究であり、評価できる点は以下のとおりである。

1. 多孔質体／流体領域の境界において、流速と圧力を連続的に接続することで質量保存を正確に満たしながら、両領域の流れの連成解析を実現した。これを可能にしたのは、多孔質領域においても圧力と流速を独立して解析できるDarcy-Brinkman式を支配方程式に採用した点と、急激な流れの変化によって両領域の境界に発生し得る数値振動を回避する変数の内挿方法を考案した点にある。
2. 提案手法による数値解の妥当性を既往研究との比較で検証し、多孔質体／流体領域における流れの連成解析を実行した。下部に多孔質体を設けたキャビティ流れの計算結果は、提案した連成解析手法によって初めて示されたものであり、本論文で示した検証はこの研究分野における新しいベンチマーク問題となる可能性が高い。
3. 多孔質体の段差をもつバックステップ流れ、四角形の空洞を有する浸透挙動の数値解析では、レイノルズ数とダルシー数の影響が定量的に評価された。バックステップ流れでは、再付着点に対するダルシー数の影響はレイノルズ数のそれに比べてかなり小さいことを示し、空洞を有する浸透流計算においては、ダルシー数と空洞形状の影響が流況に大きな影響を与えることを明らかにした。流体領域と多孔質領域の流れの同時計算においては、レイノルズ数とダルシー数の二つの無次元量を考慮する必要があり、それらの影響を定量的に示したことは、問題の現象予測にとってきわめて有用な知見となる。

以上のように、本論文は従来困難であった多孔質体／流体領域における流れを同時に計算する新たな手法を提案し、その特徴と適用性を明らかにした。提案手法とその計算結果は、二つの領域の流れを統一的に考えることのできる学術性に加え、水の浸透を許す土構造物において、水理的影響を精度よく予測する先駆的成果であり、施設機能工学、水環境工学、水資源利用工学、並びに土構造物の設計・管理保全の実務に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成30年2月19日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降 (学位授与日から3ヶ月以内)