

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13634 号
------	---------------

氏 名 豊田 智大

### 論文題目

Development of  $u-w-p$  Formulation-Based Soil-Water Coupled Finite Deformation Analysis and Elucidation of Inertia Force-Induced Phenomena

( $u-w-p$  formulationに基づく水～土骨格連成有限変形解析手法の開発と慣性力由来の諸現象の解明)

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	野田 利弘
委員	名古屋大学	教授	中野 正樹
委員	名古屋大学	准教授	中井 健太郎
委員	名古屋工業大学	教授	張 鋒

## 論文審査の結果の要旨

豊田智大君提出の論文「Development of  $u-w-p$  Formulation-Based Soil-Water Coupled Finite Deformation Analysis and Elucidation of Inertia Force-Induced Phenomena ( $u-w-p$  formulationに基づく水～土骨格連成有限変形解析手法の開発と慣性力由来の諸現象の解明)」では、これまで地盤の水～土連成解析において広く用いられてきた、間隙水の静的浸透を仮定する $u-p$  formulationと呼ばれる近似解法から脱却し、間隙水の動的浸透を考慮可能な手法として、 $u-w-p$  formulationに基づく水～土骨格連成有限変形解析コードを新たに開発している。また、種々の例題を用いて同手法のVerificationを行うとともに、慣性に由来して生じる諸現象の解明に取り組んでいる。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、序論として、本研究の背景ならびに目的について述べている。

第2章では、 $u-w-p$  formulationに基づく水～土骨格連成有限変形解析手法の支配方程式とその離散化手法を示している。同君は、間隙水の運動方程式を陽に連立することで間隙水の相対平均流速 $w$ を直接求める手法を構築している。また、updated Lagrange法を $u-w-p$  定式化の下で運用するにあたり、固液各相からみた物質時間微分を厳格に区別するとともに、液相の運動の記述について「Lagrange的に観測される固相から液相の運動をEuler的に観測する」という配置参照法を提案し、これを方程式中に「相対移流項」を考慮することで実現している。また、水～土骨格連成式を有限要素法により直接離散化するとともに、移動境界上での流量境界条件を制約条件式として連立することで、質量保存則を忠実に満たす求解法を確立している。

第3章では、新手法を動的浸透問題へと適用している。まず、 $u-w-p$  formulationを一次元浸透問題へと適用し、動水勾配作用後に、相対平均流速が次第に加速されてゆき、最終的にDarcy則に従う定常流速が達成されるという「動的浸透」が解かれることを示している。また、漸拡流に対する二次元浸透解析を通して、移流項および非排水制約条件のVerificationを行っている。

第4章では、 $u-w-p$  formulationを高透水性土の即時沈下問題に適用することで、沈下～時間関係にみられるS字カーブや非調和振動、ならびに水圧～時間関係における上載荷重と即時水圧の不一致といった特徴的な現象が解かれることを示すとともに、減衰波動方程式の理論解に基づく議論を通じて、これらが慣性に起因して生じた現象であること、また、 $u-p$  formulationによっては解かれ得ないことを示している。

第5章では、 $u-w-p$  formulationを平面ひずみ供試体の変形問題へと適用し、同手法の有効性を示している。特に、高透水性供試体に対する急速載荷計算においては、供試体内での動的migration、すなわち供試体内での反射や回転を伴う流れの発生を解いてみせた。とくに回転流は、ポテンシャル流である静的Darcy則からは決して導かれない解析結果であり、間隙水の慣性を考慮することではじめて解かれうるものである。さらに、供試体端における間隙水加速度の増減に応じて、供試体の見かけの応力経路が変化することを明らかにしている。

第6章では、調和外力による一次元振動計算を $u-p$  formulationおよび $u-w-p$  formulationにより実施し、その結果を比較している。透水係数、調和外力の角速度および時間刻み幅を変えた一連の解析結果から、 $u-p$  formulationの適用可能域外においても $u-w-p$  formulationは難なく適用可能であること、また、 $u-p$  formulation適用可能域外における $u-w-p$  解は、慣性に起因して生じる過渡応答や共振現象、ならびに水圧振幅と調和外力振幅の不一致などを与えることを明らかにしている。さらに、 $u-p$  計算が破綻するような条件下での $u-w-p$  解は、固相加速度に対して無視できないオーダーの液相相対加速度および相対移流項を含むこと、加えて、連成式の物理的意味から導かれる $\gamma_{\theta 1}$ 基準の満足と $u-p$  formulationにおける静的浸透仮定の成立は必ずしも対応しないことを指摘している。

第7章では、本研究の結論を述べている。

以上のように本論文では、飽和土の動的／静的挙動を表現可能な水～土骨格連成有限変形解析について、既往の解析手法において導入されていた「静的浸透の仮定」を排し、間隙水の動的浸透を考慮可能な $u-w-p$  formulationに基づいて新たに定式化することで、間隙水の加速度応答を伴う高透水性土の連成問題にも適用可能な手法を確立している。また、同手法を用いた一連の解析とその理論解に基づく洞察から、間隙水の慣性に起因して生じる諸現象の発生機序を明らかにしている。これらの成果は、高透水性地盤上に構築された河川堤防や港湾構造物における捨石マウンドの耐震性能照査のほか、グラベルドレーン工法の効果検証など、高透水性材料を内包する地盤の変形解析・地震応答解析を実現する上で必須のツールであり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である豊田智大君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。