

## 論文審査の結果の要旨および担当者

|      |               |
|------|---------------|
| 報告番号 | ※ 甲 第 11123 号 |
|------|---------------|

氏 名 吉川 高広

### 論 文 題 目

空気～水～土骨格連成有限変形解析手法の開発と粘性土地盤上の不飽和盛土の地震時安定問題への適用

(Development of a soil-water-air coupled finite deformation analysis method and its application to seismic stability problems of an unsaturated embankment on a clayey ground)

### 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 | 山田 正太郎 |
| 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  | 前田 健一  |

## 論文審査の結果の要旨

吉川高広君提出の「空気～水～土骨格連成有限変形解析手法の開発と粘性土地盤上の不飽和盛土の地震時安定問題への適用」では、東日本大震災で多発した河川堤防・造成宅地盛土の崩壊など、土の不飽和状態に起因する現象の解明を目的として、まず空気～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。次に、開発した解析コードの検証(Verification)をするとともに、各種排水・排気条件下の不飽和シルト側圧一定三軸試験のシミュレーションを通じて、開発コードの妥当性(Validation)を確認している。最後に、東日本大震災で多数被災した粘性土基礎地盤上の河川堤防の崩壊メカニズムを明らかにするために、地下水位の違いに注目した粘性土地盤上の不飽和盛土の築造時・地震中・地震後シミュレーションを実施している。本論文は以下に示す全6章で構成される。

第1章では、序論として、本研究の背景、意義ならびに目的を述べている。

第2章では、空気～水～土骨格連成有限変形初期値境界値問題を解くための支配方程式と数値解析手法の適用方法を示している。躍度項を含む不飽和土の速度型運動方程式と、これを数値解析的に解くための線形躍度法、さらに飽和度 $sw$ を陽に連立方程式の未知数にして解く手法(u-pw-pa-sw formulation)を新たに提案している。次に、数値解析コードの検証(Verification)を目的として、加速度が生じる条件下での一様変形場を理論的に考察して、その実現をしている。最後に、封入不飽和状態にある土の飽和度上昇を表現可能になるu-pw-pa-sw formulationの利点を示している。

第3章では、厳密には不飽和状態にあるが、事実上「飽和土」と見なされる密詰め砂供試体の側圧一定・非排水(・非排気)三軸試験のシミュレーションを実施している。解析の結果、背圧が不十分な場合は、間隙水圧が絶対圧力でゼロに近づくにつれて、空気存在による体積膨張効果が顕著になるため供試体は膨張し、軸差応力の伸びが見られなくなることを示している。併せて、密詰め砂または超過圧密粘土の非排水(・非排気)せん断時には、不飽和土は飽和土よりもせん断強度が小さくなることも示している。

第4章では、開発した解析コードの妥当性(Validation)を確認するために、各種排水・排気条件下にある不飽和シルト三軸試験を、初期値・境界値問題として捉えて数値シミュレーションを実施している。実験と同様に一つの初期状態から、背圧上昇、サクシオン付与、等方圧密、せん断までの一連の過程をシミュレートしている。解析の結果、透気性や空気の高い圧縮性を考慮するだけで不飽和シルトの数多くの力学的特徴を表現できることを示している。また、初期値・境界値問題として捉えた結果明らかになった現象も随所に示している。一方で、せん断初期の剛性や体積変化量などは、サクシオンの影響を解析モデルに取り込まないと精度よく表現できないことも示している。

第5章では、解析コードの実問題への適用として、東日本大震災で多数被災した粘性土地盤上の河川堤防の崩壊メカニズムを明らかにするために、地下水位の違いに注目した粘性土地盤上の不飽和盛土の築造時・地震中・地震後シミュレーションを実施している。築造時に関しては、地下水位が高い場合は低い場合と比べて平均骨格応力が小さく、盛土底部には閉封飽和域が形成されることを示している。地震中は、地下水位が高い方が盛土底部を中心に平均骨格応力が著しく低下して、大きなせん断変形が生じることを示している。地震後は、地下水位が高い場合には、盛土内に一時的に浸潤線が形成されることを明らかにしている。この水位上昇現象は、三相系解析を実施することに加えて、土骨格を弾塑性体として扱う場合に表現可能であることを示している。

第6章では、上記の研究成果を俯瞰的にまとめ、本論文の結論としている。

以上のように、本論文は飽和・不飽和両状態における土の静的・動的挙動を表現可能な空気～水～土骨格連成有限変形解析手法を、既往の解析手法の問題点を克服する形で開発するとともに、空気～水～土骨格連成解析の観点から、不飽和土の様々な力学的挙動の説明が可能であることを明らかにした点において学術的な成果を挙げている。また、上記手法による東日本大震災における粘性土地盤上の河川堤防のシミュレーションを実施して、地下水位の違いによる力学挙動の違いが表現可能である点や、地震後の地下水位上昇現象のメカニズムを明らかにした点において、工学的にも有用な成果を挙げている。よって、本論文の提出者、吉川高広君は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があると判定した。