

報告番号	甲 第 11123 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

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

氏 名 吉川 高広

論 文 内 容 の 要 旨

名古屋大学地盤力学研究グループでは、飽和土の力学挙動を求めるために、慣性力に対応した水～土骨格連成の有限変形解析コード **GEOASIA** を開発してきた。この解析コードは、土骨格の構成式として弾塑性構成式 SYS Cam-clay model を搭載し、Cam-clay model を土台にした同一の弾塑性理論の枠組みの中で、単位の塑性変形に対する①過圧密の解消速度、②構造の劣化速度、③誘導異方性の進展速度の三つを操作することにより、砂から粘土までその間に稠密に存在する広範な土を計算対象にする。また、材料的だけでなく幾何学的にも非線形性を考慮しているため、圧密変形問題と支持力問題などを区別することなく、変形を通じて破壊へ至る進行性破壊や液状化していた砂地盤がやがて示す圧密変形など、地盤の安定状態から不安定状態へ、そして不安定状態からまた次の安定状態へ、時間的にも空間的にも連続して解く。そして、慣性力も考慮しているから、静的問題と動的問題を区別することなく、いずれの問題も解析を連続して進めることができ、圧密中の地震や地震後の圧密挙動など様々な静的・動的の外力形態に応じて、解析コードを変えずに、土の運動／変形を次々と計算することができる。言わば、飽和土に対して何でもできる解析技術を開発・適用することで、飽和土の力学挙動を次々に解明してきた。

しかし、東日本大震災で多発した河川堤防・造成宅地盛土の崩壊や集中豪雨時に頻発する斜面崩壊など、土の不飽和状態に起因する現象の解明は、十分であるとは言い難い。切迫する南海トラフ巨大地震や先鋭化する集中豪雨を見据え、現象の解明とそれに基づく適切かつ効果的な対策工の検討のためには、飽和土の枠に囚われない、不飽和土も内包した地盤力学の構築とその工学的実践が強く望まれている。東日本大震災において未解明の課

題としては、例えば、①河川堤防の築堤時めり込み沈下で発生した閉封飽和域生成が原因とされる地震時の堤内液状化による崩壊、②千葉県浦安市などの戸建住宅地で浅層不飽和域の本震時飽和化が原因と考えられている余震時液状化、③造成宅地崩壊に及ぼしたとされる不飽和・飽和域の影響などが挙げられる。いずれも不飽和域の飽和化が課題解決の鍵であり、飽和土のみならず、不飽和土をも対象にできる静的・動的問題への対応が必須となる。そこで、本論文では静的・動的対応の水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA** を、空気～水～土骨格の三相系に拡張して、飽和土だけでなく不飽和土をも取り扱える解析コードの開発を行った。

不飽和土対応へと拡張するにあたって、本論文では、同一材料であれば飽和土と不飽和土の違いは、第一義的に空気の有無という状態の違いに起因して現れる初期値・境界値問題として捉えるのがごく自然であると考え、透気性や空気の高い圧縮性を **GEOASIA** に導入することを試みた。なお、構成式へのサクシオン効果の導入は今後の研究課題と位置付けた。すなわち、①静的・動的問題を区別なく扱う運動方程式、②変形から破壊までを一貫して扱う有限変形論、③広範な土材料を対象にする構成式理論、④不飽和土と飽和土を区別なく扱う混合体理論、の4つの単一理論の有機的連関によって、飽和土および不飽和土の力学挙動の記述を可能とする解析コードの開発を行った。この解析コードの検証と妥当性の確認 (Verification & Validation) を行うとともに、透気性や空気の高い圧縮性が土の力学挙動へ与える影響を明らかにした上で、最後には実問題へと適用した。実問題としては、東日本大震災において未解明な課題として挙げた河川堤防の崩壊メカニズムの解明を目的として、粘性土地盤上の不飽和盛土の築造時・地震時・地震後の解析を行った。

本論文は序論・結論を含め6章からなり、以下に各章の概要を示す。

第2章では、混合体理論に基づいて、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を示した。ここでは、土骨格に対する間隙水または間隙空気の相対加速度が土骨格の加速度よりも十分に小さいことを仮定する $u-p^w-p^a$ formulation として与えるが、サクシオンがゼロであっても空気が気泡として水中に封入された封入不飽和状態から飽和度 100 %の完全飽和土までの解析が可能となるように、飽和度 s^w を陽に未知数にして扱う手法を新たに提案した ($u-p^w-p^a-s^w$ formulation)。さらに、updated Lagrangian に基づいた有限変形解析を実施するために、混合体 (不飽和土) の運動方程式に対して土骨格から見た物質時間微分を施すことにより、土骨格の加速度の一階微分すなわち躍度項を有する速度型の運動方程式で与えた。土骨格の位置座標に関して3階微分を有する不飽和土の速度型運動方程式を解くために行う弱形式化と有限要素離散化、さらには離散化の結果得られる常微分方程式の陰的差分近似解法として、躍度項が線形に変化することを仮定する線形躍度法についても示した。躍度項を有する不飽和土の速度型運動方程式とその空間離散化手法および飽和度 s^w を陽に未知数とする $u-p^w-p^a-s^w$ formulation は、既往の空気～水～土骨格連成動的有限変形解析手法には見られないオリジナリティーを有する。

次に、開発した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実現した。理論的考察において、側圧一定非排水・非排気条件下にある平面ひずみ矩形供試体の等体積一様伸張圧縮変形場を実現するためには、透水係数と透気係数をゼロにするとともに、間隙水に加えて間隙空気も非圧縮性とする仮定が必要であることを示した。つまり、事実上、慣性項を考慮した $u-p^w-p^a(-s^w)$ formulation に基づく限り不飽和土の一様変形場は生じ得ないことを明らかにした。

第2章の最後には、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「 $u-p^w-p^a-s^w$ formulation」の利点を、非排水・非排気せん断試験のシミュレーションを例にとりて説明した。また、水分特性曲線の水分量として、飽和度の代わりに体積含水率または含水比を用いる場合についても、最大体積含水率または最大含水比より大きい値を扱える工夫が必要であることを示した。

第3章では、密な砂の正のダイレイタンスに着目し、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た。この結果、背圧が不十分な場合は、間隙水圧が正から負へと転じ、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、供試体は膨張して、軸差応力の伸びが見られなくなることを示した。併せて、密詰め砂または超過圧密な粘土の非排水（・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計算結果も示した。

第4章では、開発した解析コードの不飽和土の力学挙動に対する妥当性の確認(Validation)をするとともに、間隙空気の質量保存式を連立させる手法の有効性、すなわち、空気との連成効果を明らかにすることを目的として、各種排水・排気条件下にある不飽和シルト供試体の側圧一定三軸試験を初期条件・境界条件が明確に整備された初期値・境界値問題と捉えてシミュレーションを実施した。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計算した。この結果、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が明らかになった。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を示した。また、今後サクシオンを考慮した構成式研究や、ヒステリシス・間隙比の影響を考慮した水分特性に関する研究など、より精緻なモデルを搭載した解析コードを構築する場合には、不飽和土を用いた室内試験を初期条件・境界条件が明確に整備された初期値・境界値問題として常に捉える必要があることを示唆した。

第5章では、開発した解析コードを実問題へと適用した。具体的には、東日本大震災において未解明の課題として挙げた、粘性土基礎地盤上の河川堤防の崩壊メカニズム解明を目的とした数値解析を実施した。現行の河川堤防の耐震性評価手法は、液状化が懸念される砂地盤上の堤防のみを対象としているが、東日本大震災では粘性土地盤上の堤防が随所で崩壊した。この崩壊メカニズムとして、築堤時に粘性土基礎地盤の圧密沈下に伴い、地下水水位以下までめり込んだ堤体下部に飽和域（閉封飽和域）が形成され、地震時にこの領

域が液状化したことが考えられている。この数値解析的解釈／実現には、飽和と不飽和の両状態を隙間なく扱えるだけでなく、圧密沈下による閉封飽和域形成過程や崩壊過程を再現するための有限変形解析や堤体施工時から地震中・地震後までも扱える静的／動的解析が必須となる。さらには、中間土を含む粘土から砂までの広範な土材料を扱える構成式も必要となる。本論文では、被災堤体では無被災堤体に比べて地下水位が高かったという報告を受けて、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、非常に簡単な条件下で実施した。築造時に関しては、地下水位が高い場合（地下水位＝GL-0m）は低い場合（地下水位＝GL-2m）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た。これにより、地震中に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た。さらに、地震後に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た。この水位上昇現象は、地表面・盛土表面からの排気をきっかりに、閉封飽和域や粘性土地盤から盛土に向かって水が供給されることで生じ、三相系解析を実施することに加えて、土骨格を塑性体積変化が記述できる弾塑性体として扱う場合に表現可能であることを示した。