



# 間隙水分布が不飽和土の変形・強度特性に及ぼす影響とその評価方法に関する研究

加藤, 正司

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1997-03-11

(Date of Publication)

2008-10-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2119

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3129882>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002119>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	加藤正司	(京都府)
博士の専攻分野の名称	博士(工学)	
学位記番号	博ろ第152号	
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当	
学位授与の日付	平成9年3月11日	
学位論文題目	間隙水分布が不飽和土の変形・強度特性に及ぼす影響とその評価方法に関する研究	
審査委員	主査 教授 軽部大蔵	
	教授 富田佳宏	教授 内田一徳
	助教授 田中泰雄	

### 論文内容の要旨

サクシオンと土中の水分量の関係は『水分特性曲線』として知られている。その関係はサクシオンに対してユニークなものではなく、サクシオンを増加する過程と減少する過程とでは、ヒステリシスを生じて異なる関係を示す。すなわち、不飽和土の水分状態は同じサクシオンのもとでも異なる状態が存在する。このような水分量の違いは、土中の間隙水の分布状態の違いを反映するものであると考えられる。現在までの不飽和土の変形・強度特性に関する研究はサクシオンの影響のみに注目しており、不飽和土内部の間隙水の分布状態の影響に関しては研究されていないのが現状である。本研究はこの間隙水分布の状態の違いを考慮した場合の、不飽和土という工学材料の取り扱い方法の確立を目指したものである。

本論文は7章に分かれている。以下、各章の概要を述べる。

1章では、本論文に至る研究の背景と本研究の目的を述べている。

2章では、不飽和土に関する既往の研究について述べている。まず、サクシオンおよび $pF$ の概念に関する説明を行い、続いて、サクシオンの変形・強度特性に与える影響に関する過去の主な研究について解説を行っている。また、現在まで提案されている主な不飽和土の変形に関する構成モデルの要点を述べている。

3章では、土粒子接点にメニスカスが発達した理想不飽和土の挙動を予測できる、一般応力状態に適用可能な構成モデルを提案している。そして、サクシオン一定条件下の理想不飽和土の挙動を実験的に把握し、提案モデルの検証を行っている。

4章では、理想不飽和土の挙動の一つであるコラプス現象(水浸時の体積圧縮現象、以後コラプスと呼ぶ)について、三軸試験装置を用いて実験的に詳細に把握することを試みている。さらに、実験結果と従来の構成モデルによる定性的な予測の整合性について検討し、また、2章で提案したモデルによる実験結果の定量的な予測も合わせて行っている。

5章では、まず、不飽和土内部の間隙水分布の違いが変形に与える影響について考察を行い、従来の研究において1種類の成分として捉えられてきたサクシオン応力を2種類の成分に分ける考え方を

提案した。そして、各応力成分の大きさを水分特性曲線に基づいて定量的に求める手法について述べている。さらに、この2種類のサクシオン応力成分の考え方に基づいた、間隙水分分布の異なる不飽和土に対する構成モデルを提案している。そして、サクシオン履歴を与えた不飽和供試体により間隙水分分布の違いが変形・強度特性に与える影響を実験的に把握し、また、その結果に基づいて提案構成モデルの定性的・定量的な検証を行っている。

6章では、サクシオンの現場測定手法の確立を目指し、サイクロメーターとテンシオメーターを併用した測定手法の検討を行っている。このため、これら2種類のセンサーの性状を把握し、併せて実際の自然斜面においてこれらのセンサーを用いた測定結果について検討を行っている。さらに、構成モデルを実際の不飽和地盤の挙動予測に適用する場合において問題となるサクシオン～粘着力関係を一軸圧縮試験を用いて予測する手法の検討を行っている。

7章は、以上の各章より得られる結論を述べたものである。

以下の点に関して、本研究より得られた結論を述べる。

#### (1) バルク水とメニスカス水の影響の評価方法

間隙を占めるバルク水と土粒子接点でメニスカスを形成するメニスカス水は、粒子接点に与える影響が異なる。バルク水は粒子接平面に対してせん断力と垂直力を発生させる。すなわち、バルク水の影響は外力が粒子接点に与える影響と等しい。このためバルク水による応力成分（バルク応力）は外力による応力成分（Net stress）とともに土骨格を圧縮する応力成分として扱うことができる。一方、メニスカス水は垂直力のみを発生させ、内力として扱われる。不飽和状態における水分量は、吸着水、バルク水、メニスカス水に分けることができる。そこで、メニスカス水と吸着水のみ状態における水分量とサクシオンの関係を示す『最乾燥水分線』を用いて各水分量を求め、バルク応力、メニスカス応力をこれらの水分量に基づいて決定する方法を提案した。そして、不飽和土の三軸試験結果に基づくサクシオン応力の実測値は、提案方法に基づく理論値とほぼ一致し、以上の方法が検証されたものと考えられる。

#### (2) バルク水とメニスカス水の影響を取り入れた構成モデルとその検証

##### a) Modified ISMPに基づく構成モデル

サクシオンのせん断強度への影響は粘着力として現れる。この粘着力 $c$ は $\sigma$ 軸上の換算垂直応力 $\sigma_0$  ( $=c \cdot \cot \phi$ ,  $\phi$ : 内部摩擦角)として評価される。この $\sigma_0$ は土塊中に分布した間隙水の有するサクシオンにより生じるものであるから、(1)で述べたようにバルク水による成分 $\sigma_b$ とメニスカス水による成分 $\sigma_m$ に分けることができる。この考え方に基づくと、大槓の提案した中間空間滑動面 (ISMP) の方向余弦は、粒子接点角分布に影響を与える応力である外力 (Net stress) とバルク応力により修正される。修正された中間空間滑動面 (Modified ISMP) は、このバルク応力により修正された方向余弦を持つ滑動面である。Modified ISMPに基づく応力とひずみに関するパラメーターを用いて、軽部による等塑性体積ひずみ式を導入することにより、 $t_N \sim t_S \sim \sigma_0$ 空間において等塑性仕事相当量面が定義される。提案構成モデルではこの面を降伏面とし、非関連流れ則を適用するものとする。このモデルの特徴としてはサクシオンの変化に対するパラメーターの修正を考慮しなくてもよいことが挙げられる。

提案モデルによるサクシオン一定条件下の三軸圧縮・三軸伸張せん断試験の予測値および等方応力条件下およびせん断応力一定条件下のコラプスの予測値は、実測値に近い値を示した。

## b) バルク応力とメニスカス応力を取り入れた拡張Cam Clay型の構成モデル

Cam Clayモデルにおける軸圧縮中のエネルギー釣り合い式が、不飽和状態の土に対して拡張できるものと仮定する。この拡張されたエネルギー釣り合い式に直交則を適用し、関連流れ則を仮定すると、等塑性体積ひずみポテンシャルが誘導される。この式に、軽部による不飽和土の等方応力下の塑性体積ひずみ式を組み合わせることにより、塑性体積ひずみに関する状態境界面が得られる。提案モデルはこの状態境界面に基づくものである。なお、せん断ひずみに関しては、エネルギー釣り合い式より得られる流れ則を適用する。

以上のような構成モデルに対して、サクシジョン履歴を与えて、間隙水分布の異なる状態となった不飽和供試体を用いた等方圧縮およびせん断試験結果により、その妥当性を検証した。そして、三軸圧縮試験結果についてせん断前のサクシジョン応力を用いて予測を行い、予測値が実験結果とよく対応していることを示した。また、サクシジョンおよび平均主応力による等方圧縮試験より得られた $s \sim \log p$ 関係と $e \sim \log p$ 関係は、提案モデルによる降伏線に基づく予測を定性的に支持した。

### (3) 不飽和土のコラプスに関する実験的検討

等方応力条件下での平均主応力を一定とした水浸試験の結果は、次のようにまとめられる。

1. 水浸試料の水浸時における圧縮量は、水浸試料と初期水浸試料との飽和度差が最大となる平均主応力のもとで最大となった。
2. コラプス時の圧縮量は、吸水量に対し比例的に増加する傾向を示した。このことは、吸水により水が侵入した間隙で圧縮が生じていることを示している。
3. 初期水浸試料をせん断した場合と水浸試料を水浸後に同じ応力点からせん断した場合を比較すると、せん断強度だけでなく変形特性もほぼ同じであることがわかった。このことは、従来提案されている構成モデルに基づく予測と一致している。

せん断条件下で平均主応力とせん断応力と一定とした水浸試験の結果は、次のようにまとめられる。

1. 高いサクシジョンのもとで圧縮せん断すると、せん断変形とともに供試体の透水性が極端に低下した。この現象には変形によりバルク水を形成する水膜が破れて、バルク水がメニスカス水となることが影響していると考えられる。
2. せん断条件下のコラプス時の間隙比変化量（圧縮量）と含水比変化量（吸水量）の関係は、等方応力条件下における場合と同様に比例的に増加する傾向を示した。このことは、コラプスが本質的には吸水による土骨格剛性の低下により生じる現象であることを示していると考えられる。

### (4) 地盤土の持つサクシジョンの測定方法と不飽和土のせん断強度の推定方法

自然斜面における提案方法による測定結果では、サイクロメーターの測定値は不安定なものとなった。これは、自然斜面内でのサクシジョンの大きさがサイクロメーターの測定限界以下であったためと考えられる。テンシオメーターは、ケーシングパイプを用いて雨水の浸透等を防ぐ処置をした場合には、長期にわたり信頼性のあるデータが得られた。現場での測定では、測定器の設置方法が重要なポイントとなると考えられる。

低飽和度の不飽和土の一軸圧縮試験結果に基づくサクシジョン～換算垂直応力 $\sigma_v$ 関係は、三軸圧縮試験から予想される関係に近いことが示された。このことは、サクシジョンを測定した一軸圧縮試験によっても不飽和土のサクシジョン～粘着力関係が予測可能であることを示している。(換算垂直応力 $\sigma_v = c \cdot \cot \phi$ ,  $\phi$ : 内部摩擦角) よって、サクシジョンを測定した一軸圧縮試験は、原位置のサクシジョンが

測定された場合にその地盤の有する粘着力を知る簡便な方法の一つとなると考えられる。

## 論文審査の結果の要旨

地盤基礎工学の主要な基礎理論の一つである土質力学の理論体系は、地盤を構成する土が完全に水で飽和されているとの仮定に立つ有効応力説によって組み立てられている。しかし、現実の地盤は不飽和状態にあるものも多く、これらの地盤ではその挙動予測は困難となっている。過去30年来、不飽和土に対する有効応力が探し求められてきたが、最近、それが定義できないことが証明されるに及び、新たに不飽和土を対象とした理論の枠組みを構築する試みが進められている。本論文の提出者はこのような流れの中で、先進的に研究を行ってきた一人である。

本論文は7章から成る。第1章では、本論文の背景と研究の目的を述べている。第2章では、不飽和地盤の物理的性質とその測定方法をまとめ、また、既往の研究を現在の研究動向に至る過程を中心に概観している。

第3章では、土中水が土粒子表面への吸着水と、土粒子接点の周りを取り巻くメニスカス水だけから成る理想状態の土塊を想定し、これに対応する土中の応力を表現する応力成分を明らかにした。

さらに、現在、飽和土に対する最も精緻な構成方程式の一つである $T_{ij}$ モデル（改訂SMPモデル）を理想不飽和状態に対応できるように修正し、別に行った不飽和状態における一般応力三軸試験の結果を解析した。実験についていえば、不飽和状態における力学試験は、測定項目が多く困難であるが、さらに一般応力三軸試験は、任意の3主応力を載荷するために飽和状態においても高度な技術を要する。従って著者が行った試験は非常に高度なものであり、結果の資料価値は高い。ただし、本章では、理想的状態にあるとして導いた理論の適用性の検討に重点が置かれ、試料そのものの理想的状態からのずれが指摘されている。

第4章では不飽和土特有の現象とされているコラプス（吸水収縮）現象を三軸試験機内で再現し、その間の内部の応力を詳細に測定した。一方、前章で開発した不飽和状態対応 $T_{ij}$ モデルに試験条件を与え、内部応力や供試体のひずみの経時変化について解析し、実測値と比較検討した。その結果、開発したモデルは乾燥側の土に対しては妥当な結果を示すが、飽和状態に近い土に対しては誤差が大きくなることがわかった。

第5章では、前章で問題となった湿潤側の不飽和土に適用できる構成方程式を主題としている。現在、多数の降伏線を組み合わせた複雑な弾塑性理論がいくつか提案されているが、本論文では基本に戻り、間隙水の作用を分析した。その結果、湿潤側の土は、吸着水とメニスカス水の他に、土骨格を埋める水（バルク水と仮称）が現れ、これがメニスカス数を減少させていることがわかった。また、メニスカス水とバルク水の力学的作用が異なっていることがわかった。そこで水分特性曲線を利用して、各間隙水の量を算定する方法を開発し、各作用の大きさを定量化し、構成方程式に取り込めるようにした。この理論の検証は三軸圧縮試験によって行われた。

第6章では、不飽和斜面の安定解析を主題としている。現実の斜面は降雨などの吸水により飽和化され崩壊を起こすことがある。本論文では構成方程式に必要な地盤サクショと含水量の測定方法を様々な角度から検討し、現場測定を行っている。この結果、各測定方法の測定原理の優劣や測定器の備えるべき機能などが明らかになった。

第7章では前章までの研究をまとめ、今後の研究発展の方向を展望している。

以上、要するに本研究は、地盤の不飽和状態における力学的挙動を研究したものであり、主として

間隙水の作用について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者 加藤正司は、博士（工学）の学位を有する資格があると認める。