



# 水分特性曲線のモデル化および不飽和土における土骨格と土中水の連成問題

河井, 克之

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2001-03-13

(Date of Publication)

2007-09-26

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2500

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002500>

※ 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。



【279】

氏名・(本籍) 河井 克之 (兵庫県)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学位記番号 博ろ第214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13年3月13日

【学位論文題目】

水分特性曲線のモデル化及び不飽和土における  
土骨格と土中水の連成問題

審査委員

主査 教授 軽部 大蔵

教授 川谷 健      教授 日下部 馨

助教授 飯塚 敦

本論文は、不飽和土の力学的挙動の予測手法の確立を目指したものであり、特に土骨格と土中水の相互作用に関する研究成果をまとめたものである。

地盤を形成する土質材料は、固体である土粒子部分とその空隙を満たす間隙水および間隙空気より成る。空隙が水で満たされている飽和土に関しては Terzaghi の有効応力原理が成り立ち、複雑な粒状体である土の構成モデルが開発され、実用に供されている。空隙が水だけでなく空気を含む不飽和土に関しては、いまだに実地盤への適用には至っていない。一般的に、地表面近くの地盤は不飽和状態にあり、地下水位以下の飽和状態まで、徐々に飽和度を増しながら不飽和土の層が形成されている。自然界において、飽和土は不飽和状態の特別なケースとして考えるべきである。また、人口の土構造物の材料として用いられている締固め土は、不飽和土である。しかしながら、不飽和土は飽和土よりも圧縮性が低く、強度も大きいこと、また本来不飽和土であっても構造物の破壊は飽和状態に達したときに起こることが多いなどの理由で、構造物設計の際には飽和土理論で代替することが多い。ただし、このような不飽和地盤は降雨による浸潤や、地下水位の変動などにより、長い年月を経て乾燥と湿潤を繰り返す、そのひずみが生じていることは確かである。このような構造物の品質管理においては、飽和土理論は適用できず、不飽和土の力学理論の整備とともに現場への適用が求められている。

近年、不飽和土の研究が進み、いくつかの不飽和土構成モデルが提案され、初期値・境界値問題として定式化されるまでに発展を遂げている。しかしながら、一方で不飽和土の浸透特性に関する研究が力学的挙動とは独立に研究が進められ、本来相互作用を及ぼし合う土中水の移動と土骨格の変形特性が個別に表現されてきた。これが、不飽和土理論の実地盤への適用を遅らせている原因と考える。不飽和土の土/水連成解析を行うためには、この2つの挙動を矛盾なく橋渡しする道具が必要となる。本研究は、この橋渡しの役割をする水分特性曲線の定量化とともに、土骨格と土中水の相互作用を解明することにある。

第1章では、これまでの不飽和土構成モデルが作られてきた研究背景について述べている。不飽和土の研究は、飽和土理論に適用されているような有効応力の探求に始まった。Bishop の有効応力式は、実質応力(全応力から間隙空気圧を差し引いた応力成分)とサクションに着目した点で、現在の不飽和土の力学理論の基礎となっているが、不飽和土特有のコラプス現象を表現することができない。結局、サクションを有効応力の構成要素として取り扱うのではなく、独立した応力成分として構成モデルに組み込むことが妥当であるとの考え方によりいくつかの不飽和土構成モデルが提案されるに至っている。その中で、軽部の構成モデルは飽和土の力学を包含するものであり、変数として間隙水分分布を与えることで不飽和土の挙動を予測できるという点で優れていることが確認できた。ただし、間隙水分分布を与える水分特性曲線に強く依存するモデルであり、応力成分の導出に影響を及ぼす最乾燥水分線とともに、水分特性曲線の定量化が必要であることが明確であるとともに、本論文での問題提起となっている。

第2章では、水分特性曲線の定量化に眼目を置いた。まず、これまで個別に議論されてきた水

分特性曲線に及ぼす要因を解明するために、同一の試料で異なる初期状態、応力条件下での水分特性曲線を得た。その結果、間隙比が水分特性に大きく影響を及ぼしていることが分かった。この間隙比の影響を定量化するために、最も簡単な Brooks and Corey 式を用いて近似を行い、得られた形状パラメーターを物理的に解釈し、水分特性曲線モデルへ関数として導入することに成功した。間隙比の影響は、脱水曲線では空気侵入値に、吸水曲線では水侵入値に現れることが分かった。この間隙比と空気侵入値の関係を空気侵入値線、水侵入値との関係を水侵入値線として、Toll の提案する間隙比/等価間隙比面に投影し、新たな水分特性曲線モデルを提案した。モデルは吸水曲線について良い合致を示したが、脱水曲線に関しては今後更なる研究の蓄積が必要であることが分かった。

第3章では、構成モデルの中で不飽和土の強度特性に影響を及ぼすとされている、サクシオン応力について検討した。以前より、排水条件下での強度特性についてはサクシオン応力を導入することによって、飽和土と同じ破壊基準を不飽和土にも適用できることが確認されていたが、非排水試験に関しては未解明であった。ここでは、不飽和土の非排水せん断強度を三軸圧縮試験と一軸圧縮試験によって求めた。用いた試料は、飽和状態でもせん断中に正のダイレイタンスを生じるものであったが、飽和度が低くなるほどにその傾向が顕著となることが分かった。しかしながら、せん断中のサクシオン変化によりその傾向は排水条件下での挙動に比べると、バルク応力の影響と判断できる違いが確認できた。また、せん断中のサクシオン～飽和度関係は、供試体のダイレイタンスが小さい段階では、第2章で提案した水分特性曲線モデルを満たす結果となることが分かった。これは、土/水連成解析において暗に数値計算上組み込まれている土骨格の変形と土中水の移動の相互作用が、水分特性曲線に矛盾のないように表現されることを表す結果となった。また、強度試験結果に分散があるとされている一軸圧縮試験結果はサクシオン応力で整理できることが分かった。そして、一軸圧縮試験より得られる強度特性から実地盤のサクシオンを推定できる可能性について考察を加えた。現場のサクシオン測定には、特別な測定器具と技術を要するため、信頼できるデータを得ることは難しい。しかしながら、それを簡便な一軸圧縮試験で得ることができれば、不飽和土の力学定数を得るのに大幅な労力削減となろう。結果的に、ある程度の適用性が認められた。

第4章では、不飽和土の分応力について検討を行った。軽部の構成モデルでは、サクシオンが変形に対して寄与するのはバルク水に対してのみである。そのバルク水とメニスカス水の構成割合を表現するために最乾燥水分線の概念を導入しているが、あくまでも仮定の域を出ない。第4章では、定サクシオン下での異方圧密試験および非排水等方圧縮試験の結果より最乾燥水分線を逆算することを試みた。まずは、種々の応力比で飽和土の異方圧密試験を行い、側方ひずみがゼロとなるときの応力比、静止土圧係数を算定した。そして、定サクシオン下で不飽和土の異方圧密試験を行い、同様に応力比と側方ひずみの関係を調べた。そして、このとき実質応力とバルク応力の和で軸方向、側方方向の応力比を表せば、飽和土と同じ静止土圧係数が得られることが確

認できた。そして、この結果は、様々なサクション値で異方圧密試験を行えば、最乾燥水分線を試験より導くことが可能であることを示唆している。また、第3章との試験結果と合わせて、応力増分方向への多少の依存性はあるものの、理論降伏面に垂直にひずみ増分が発生することが分かった。ここで軽部らの構成モデルは、不飽和土の塑性状態でのエネルギー釣り合い式に関連流れ則を適用することで降伏面を導いているが、その正当性が確かめられた。また、非排水等方圧縮試験結果から最乾燥水分線を導く方法を試みているが、良好な結果が得られたとは言い難い。しかしながら、定性的な最乾燥水分線の形状を判断できることが分かり、空気侵入値以下のサクション領域において最乾燥水分線を二次放物線補完している軽部のモデルに近い形状となっていることが分かった。これらの結果から、異方圧密試験によって定量的に求められた最乾燥水分線上の一点を通るように軽部の最乾燥水分線式のパラメーター設定を行うのが最善であると考えられる。

第5章では、第2章で得られた水分特性曲線の性質をなるべく簡単な形で解析モデルに導入する方法を提案している。その結果、水分特性曲線で与えたヒステリシスが応力成分のヒステリシスを生じさせ、これまで表現できなかったフィルダムの貯水位変動によるひずみの蓄積現象を説明できる事が分かった。また、公用の水分特性データベース UNSODA を用い、本研究で用いた試料の水分特性曲線と比較した。その結果は、データベースに含まれる情報の評価によっては良好な結果を得ることができると分かった。

第6章では、各章により得られた知見をまとめて結論とした。

氏名	河井克之		
論文題目	水分特性曲線のモデル化および不飽和土における土骨格と土中水の連成問題		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	軽部 大蔵
	副査	教授	川谷 健
	副査	教授	日下部 馨
	副査	助教授	飯塚 敦
	副査		
要 旨			
<p>堤防や造成地盤のように土を材料とする構造物(土構造物)が破壊や大変形をきたすのは、外水位の上昇や降雨など外部からの給水を機会とすることが多い。一方、これらを扱う地盤工学では、従来、土がすでに浸水状態にある場合しか解析できなかった。そのため、常時には健全であった土構造物が浸水によって弱体化していく過程や乾湿の繰り返しに伴うひずみの蓄積現象を追跡することができず、このことが防災計画立案上の技術的な壁となっていた。本学位論文は、学位申請者が属する研究グループが既に提案している土の構成モデル(当該モデル)を基礎に、新たに非排水試験や異方圧密試験を行って、これらを当該モデルを用いて初めて解析した。また、このモデルに必要な水分特性曲線の式を独自に開発して、当該モデルを実用段階に高め、さらにこれと飽和・</p>			

不飽和浸透式を組み合わせ、土構造物を土/水連成解析することにより、所期の目的である浸水に伴う土構造物の挙動の追跡を行う方法を論じたものである。

第1章では、不飽和状態を含む土の構成モデルの研究の歴史を概観し、現在提案されている主なモデルを検討することを通じ当該モデルの特徴を明らかにしている。すなわち、他のモデルは、不飽和状態の微視的構造を構成式に取り込んでいないために、土のサクシヨン履歴に伴う水分特性曲線のヒステリシスの影響を表現しようとするならば、いくつかのパラメータを実験結果に基づいて設定しなければならず、その意味で予測性能に問題がある。一方、当該モデルは、本来、水分特性曲線に依存するように作られているので、水分特性曲線を式示す必要がある。本章は、このような各モデルの位置付けを行っている。

第2章では、上記当該モデルが水分特性曲線に依存していることから、与えられた土の水分特性曲線がその土の状態によってどのように変化するかを、多くの水分特性試験を行って実験的に調べ、その結果、試料が与えられた場合、その試料の水分特性曲線のパラメータが間隙比の関数となることを見出し、重要ないくつかのパラメータを間隙比の関数として式示した。なお、水分特性曲線は一般に吸水・排水過程の別により大きなヒステリシスを示すが本論文ではその表現にも成功している。

第3章では、上記当該モデルが飽和・不飽和状態の別なく共通の破壊規準を与える点について、従来の排水三軸試験に加えて新

たに非排水三軸試験を行い、当該モデルの有効性を確認した。また、非排水状態であっても、せん断中にはダイレイタンシーによって飽和度が低下するが、これに伴うサクシジョンの増加量は既往の水分特性曲線から推定できることを実証した。これは不飽和状態に対する構成方程式の汎用性を確認したものといえる。さらに、非排水試験の一種である一軸圧縮試験の結果から、その地盤のサクシジョン(水分要求圧力)を逆算的に推定する方法を提案している。

第4章では、飽和試料および定サクシジョン下での不飽和供試体について異方圧密試験を行い、当該モデルが仮定した分応力が妥当であることを示した。また、種々の応力比の下で行った異方圧密試験中のひずみ増分方向より、当該モデル導出時における基本的仮定であるエネルギー収支式及び直交条件式が実験的に成立していることを確認した。さらに、上記分応力を定義するために導入されている「最乾燥水分線」が異方圧密試験結果から推定できることを示した。

第5章では、最終目標である土/水連成解析が実用上十分な精度を保って行える程度まで水分特性曲線の関数形を単純化する方法を提案している。こうして決定された水分特性曲線ヒステリシスループを用いることにより、従来の他モデルでは表現できなかったアースダムの貯水位の繰返し変動に伴うダム体へのひずみの蓄積現象が説明できることが分かった。第6章では、以上の論述をまとめて結論としている。

以上、要するに本研究は一般に不飽和状態にある土構造物に対

する水環境の変化に伴う強度・変形挙動を追跡する手法を、実験と理論的考察によって導出したものであって、地盤工学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、河井克之は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。