

## 学位論文の要旨

氏名

荒木功平

学位論文題目

不飽和土の数値力学モデルに関する基礎的研究

本論文は、不飽和土の数値力学モデルに関する研究成果をまとめたものである。

第1章では、研究の背景と目的について述べている。

第2章では、浸透理論と構成則に関する既往の研究の成果についてまとめた。土の浸透理論および構成則は、水分特性曲線を土の物理的性質と排水履歴から決定することが可能となれば、工学的に意義があることを述べた。また、含水状態を表すパラメータの中で、土の透水性や変形特性を表す際に飽和度が重要なパラメータであることを述べた。

第3章では、数値力学モデルに関するパラメータについて考察している。砂と粘土を比較すると粘土の間隙比が一般に大きくなることを述べ、間隙比が大きい試料は乾燥密度が小さいので、砂に比べて粘土の締固め曲線が下側になることを説明した。粒度分布、間隙径分布、締固め曲線が関係していることを述べた。一方、含水状態を表す指標として飽和度もしくは有効飽和度を用いる必要があることを述べた。また、今後の土質力学（特に不飽和土の力学）には、化学ポテンシャル（もしくはサクシオン）が重要なパラメータとなると考えられるので、化学ポテンシャル（もしくはサクシオン）の計測法の1つである蒸気圧法の測定原理について言及した。粒状体の破碎性と温度変化を無視したときにサクシオンと化学ポテンシャルが等しくなることを述べた。逆にいえば、破碎性や温度変化がある場合にはマトリックサクシオンとマトリックポテンシャルが等しくならない可能性があることを述べた。

第4章では、間隙モデルに有効飽和度の概念を導入した。このモデルによると、水の接触角が大きく、間隙比が大きいほど水分特性曲線が下側にくることを述べた。したがって、土の水分特性曲線のヒステリシスに水の接触角と体積変化が大きく影響していることを明らかにした。

また、間隙モデルに臨界レイノルズ数を導入した。臨界レイノルズ数より小さい領域で層流状態の式（ハーゲン・ポアズイユ流れ）を考慮できることを明らかにした。

第5章では、不飽和土の圧縮・せん断挙動の数値力学モデルを確立するため、サクシオンを考慮した粒子間力の評価手法について考察した。接点角の連続的な変化挙動に対して、マルコフ過程を適用し、粒子の移動の可逆、不可逆な変化を定めるポテンシャル障壁において、土粒子間力を評価した。

粒子接点の不連続な挙動を評価する「粒子接点の発生・消滅」パラメータと粒状体の体積や粒状体に与えられたエネルギーを関連づけた。また、三軸試験を行い、「粒子接点の発生・消滅」を表すパラメータが諸戸のエントロピーと関連づけられることを示した。

第6章では、締固め曲線のモデル化を行った。締固め曲線より得られるパラメータを間隙モデルに適用して得られる水分特性曲線が保水性試験から得られるそれとよく一致することを示した。

第7章では、斜面安定解析に影響を及ぼすパラメータの感度分析を行った。その結果、地下水位が上昇すると崩壊確率が大きくなることを示した。また、降雨に伴うわずかな見かけの粘着成分の低下が崩壊確率に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。

第8章では、本研究の成果を総括した。

## 論文審査の要旨

報告番号	理工研 第221号	氏名	荒木 功平
審査委員	主査	北村 良介	
	副査	河野 健二	西 隆一郎

## 学位論文題目

不飽和土の数値力学モデルに関する基礎的研究

(Basic Study on Numerical Models for Unsaturated Soils)

## 審査要旨

提出された学位論文及び論文目録等を基に学位論文審査を実施した。本論文は不飽和土の数値力学モデルについて述べたもので、全文8章より構成されている。

第1章は研究の背景と目的について述べている。

第2章では浸透理論と構成則に関する既往の研究をレビューしている。

第3章では熱力学に基づいた考察より不飽和土の力学挙動を解析するためにはサクシオン（化学ポテンシャル）、有効飽和度が有用な物理量であることを示している。

第4章では不飽和土の保水・透水挙動を解析するための数値力学モデルを提案している。本モデルを用いると、標準化された土質試験よりモデルパラメータが決められ、不飽和土の水分特性曲線、不飽和透水係数・有効飽和度関係を算出できること、水分特性曲線のヒステリシスを表現できることを明らかにしている。

第5章では不飽和土の圧縮・せん断挙動を解析するための数値力学モデルを提案している。本モデルを用いると、土粒子接点で形成されるメニスカスに基因する粒子間力を評価し、圧縮・せん断過程での応力-ひずみ関係を誘導できることを明らかにしている。土粒子接点の連続的な変化はマルコフ過程によって評価し、不連続な変化はなされたエネルギーと関連させて評価している。

第6章では第4章で得られた数値力学モデルを不飽和土の締固め挙動の解析に適用し、有用性を明らかにしている。その際、残留飽和度・擬似飽和度が不飽和土の材料係数となることを示している。

第7章では第4章で得られた数値力学モデルを降雨に伴う斜面の不安定化を評価するために適用し、降雨に伴って変化する崩壊確率を誘導している。

第8章では本論文での成果を総括している。

本論文では、不飽和土の数値力学モデルを提案し、その有用性を明らかにしている。これらの成果は降雨にともなう斜面崩壊の予知、Capillary Barrierを応用した各種土構造物の保水・透水挙動の解析に適用することができ、防災・減災、環境への負荷の少ない土木施工に貢献できるものと期待される。

よって、審査委員会は博士（工学）の学位論文として合格と判定する。

## 最終試験結果の要旨

報告番号	理工研 第 <b>221</b> 号	氏名	荒木 功平
審査委員	主査	北村 良介	
	副査	河野 健二	西 隆一郎

平成18年2月 3日（金）に論文発表会が開催され、1時間余の説明と30分余の活発な質疑応答が発表者と審査委員を含む参加者との間でなされ、発表者からの的確な回答が得られた。

主な質疑応答内容を以下に記す。

【質問】

間隙モデルを用いた不飽和透水係数の算出に際して臨界レイノルズ数を導入しているが、土中での間隙水の臨界レイノルズ数は推定可能か。

【回答】

本論文では臨界レイノルズ数として2300を用いている。臨界レイノルズ数を導入したのは、数値力学モデルを用いた計算では、飽和度が100%付近で不飽和透水係数が急増し、実現象と差異がある。実現象を表現するための手法の一つとして臨界レイノルズ数の導入を試みた。数値力学モデルをパイピング現象などに適用するためには臨界レイノルズ数を導入することは有用ではないかと考えている。

【質問】

不飽和土のせん断過程での応力-ひずみ関係を計算する際、Bishopの有効応力式中に含まれるパラメータはどのように決めているか。

【回答】

サクションが0kPaの時は $\chi=1$ 、100kPaの時は $\chi=1$ と仮定した。間隙モデルを用いると $\chi$ と飽和度の関係が誘導できているので、それを適用した計算が可能である。

【質問】

斜面の崩壊確率の計算の際、内部摩擦角 $\phi$ と見掛けの粘着成分 $c$ を確率変数と見なし、2次元正規分布を適用して、崩壊確率を出しているが、 $c$ と $\phi$ の関係はどのようにして導いたのか。

【回答】

安全率 $F$ を1として $c$ と $\phi$ の関係を導いている。安全率 $F=1$ は、崩壊確率50%に対応している。

【質問】

斜面の崩壊確率の計算の際、内部摩擦角と見掛けの粘着成分のバラツキを正規分布で評価しているが、正規分布の標準偏差はどのように決めているのか。

【回答】

既往の文献を参照し、平均値の1/10としている。斜面安定解析の精度を向上させるためには、内部摩擦角と見掛けの粘着成分のバラツキの統計的な見地から考察する必要がある。

【質問】

斜面崩壊予知に関連し、気象庁は土壌雨量指数を導入している。本指標と本論文の斜面崩壊予知手法とはどのような関係にあるのか。

【回答】

土壌雨量指数は雨量情報のみから算出されている。本論文で提案している手法は降雨による地盤の含水量の変化を評価し、防災情報として発信しようとするものである。土壌雨量指数と本手法とを結び付けることによって防災情報の精度向上が期待される。

以上の結果、3名の審査委員は申請者が大学院博士後期課程修了者とした十分な学力と見識を有するものと認め、博士（工学）の学位を与えるに足りる資格を有するものと判定した。