

## 不飽和土・不飽和地盤

### 1. 講座を始めるにあたって

北村 良介 (きたむら りょうすけ)

鹿児島大学教授 工学部

#### 1.1 まえがき

多くの土質力学の教科書では図-1.1に示す土の相構成図が最初に出てくる。図に示されるように土は土粒子実質部分(固体)とその間隙を満たしている流体(気体、液体)から成り立っている。間隙が気体と液体で満たされている土を不飽和土という。間隙が気体のみ、あるいは液体のみで満たされている土をそれぞれ乾燥土、飽和土という。すなわち、不飽和土は土粒子(固相)、間隙水(液相)、間隙空気(気相)からなる三相系材料であるのに対して、飽和土、乾燥土は土粒子(固相)と間隙水(液相)、あるいは土粒子(固相)と間隙空気(気相)からなる二相系材料である。土は含水量に依存して乾燥土(二相系材料)→不飽和土(三相系材料)→飽和土(二相系材料)に変化する。二相系材料と三相系材料は本来全く異なる材料であるにもかかわらず、従来の土質力学は三相系材料である不飽和土に真正面から取り組むことを避け、三相系材料に比べて取扱いが簡単である二相系材料である飽和土(飽和度100%)、乾燥土(飽和度0%)の力学特性を不飽和土(0%<飽和度<100%)に内挿することによって処理してきた。21世紀の土質力学は不飽和土に真正面から取り組み、不飽和土(0%<飽和度<100%)の延長上に飽和土(飽和度100%)、乾燥土(飽和度0%)があるという立場から土に固有な不飽和土質力学を確立しなければならない。

不飽和土・不飽和地盤に関する本論に入る前に、身近にみられる不飽和土・不飽和地盤に関連した現象を取り上げてみよう。

コーヒーの愛好家は豆を選択し、乾燥状態で保管し、飲む直前に破碎する(図-1.2参照)。破碎の程度によってコーヒー豆粒子の粒度分布が変化する。粒度分布、間隙比が異なれば、浸透特性が異なる。粉碎されたコーヒー豆粒子をろ紙の敷かれたドリップ容器に入れ(乾燥土に対応)、お湯を注ぐ。お湯を注ぎ始めて暫くの間コーヒー豆は不飽和状態にあり、コラプス(あるいは水締め)によって体積が減少する。その後、体積が一定となり、注入量と排水量が同じになった状態は定水位透水試験に対応する。ドリップ容器一杯まで入れて放置した状態は変水位透水試験に対応する。コーヒーの美味しさは、コーヒー豆の粒度分布、初期間隙比、ろ紙の不飽和・飽和透水係数、お湯の注ぎ方(水頭)、ドリップ容器の穴の断面積・個数の関数であり、美味しさを定量的

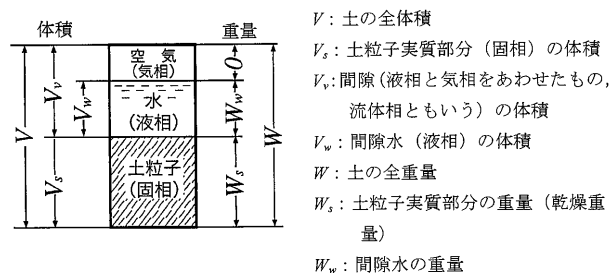


図-1.1 土の相構成図

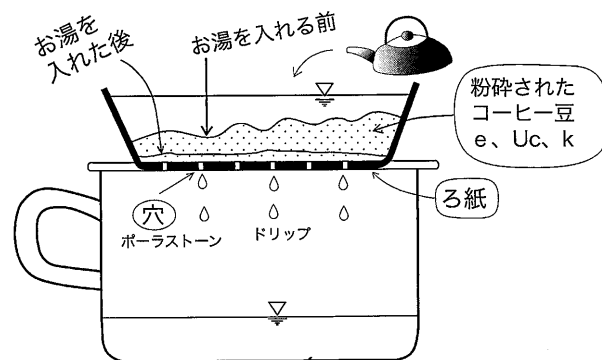


図-1.2 コーヒーメーカー(ドリップ)

に評価するためにはこれらの関係を明らかにする必要がある。コーヒー豆を土粒子に置き換えると飽和・不飽和浸透流解析という難しい用語が使われるが、流体の挙動の基本的な原理は同じである。

奈良県明日香村にある高松塚古墳では壁画保存のための作業が進められている。古墳は代表的な版築構造物であり、粒度分布、締固めエネルギーの異なる不飽和土を何層にも積み重ね、石室に雨水が浸透することを防ぎ、温度・湿度が一定な空間を創出している。古代のアジアの地盤技術者は Capillary Barrier (3章参照)の原理を理解し、古墳を構築したものと考えられる。現代の技術で高松塚古墳と同じ品質を有する土構造物を作ろうとすれば、不飽和土質力学の成果を基礎にする必要がある。

最近、満杯になった廃棄物処分場の覆土(キャッピング)に古墳の止水技術を適用しようとする試みがなされている。粒度分布、締固めエネルギーの異なる不飽和土を積み重ねることによって土中水の流動を制御する技術は、地球環境への負荷の少ない技術として種々の土構造物(斜面、堤防)への適用が考えられる。

本講座では、不飽和土(室内土質試験で用いる試料)、不飽和地盤(不飽和土からなるフィールド)での現象

## 講座

(事実)を記述することに重点をおき、分かりやすく説明することに心がける。連続体力学に基づく力学モデルには言及しない。

## 1.2 本講座の構成と内容

構成と内容を紹介する前に、用語の説明をしておく。

Terzaghi は飽和土の力学特性が有効応力 (= 全応力 - 間隙水圧) という物理量によって支配されていることを明らかにした。Bishop は飽和土の有効応力式に対応する不飽和土の有効応力式を次式のように提案した。

$$\sigma = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad \dots\dots\dots(1)$$

その後、多くの有効応力式が提案されているが、飽和土の有効応力式に対応する広く認知された不飽和土の有効応力式は未だ確定していない。ビショップの有効応力式は  $(\sigma$  (全応力)  $- u_a$  (間隙空気圧)) と  $(u_a$  (間隙空気圧)  $- u_w$  (間隙水圧)) とパラメータ  $\chi$  から成り立っている。 $(\sigma$  (全応力)  $- u_a$  (間隙空気圧)) を基底応力 (net stress),  $(u_a$  (間隙空気圧)  $- u_w$  (間隙水圧)) の絶対値をサクシオン (suction) と称する。パラメータ  $\chi$  はサクシオンの有効応力への寄与の度合いを評価するものであり、飽和度に依存して 0 (乾燥土) から 1 (飽和土) まで変化する。

地下水位より上の地表面に近い不飽和土中の間隙水圧は間隙空気圧 (大気圧) より低い状態にある。大気圧を基準 (ゼロ) とすると、間隙水圧は負値となる。不飽和土には不飽和土にしか生じない物理量であるサクシオンが発生している。前述の定義によれば、サクシオンは常に正値をとる。したがって、サクシオンが大きくなるということは負の間隙水圧が小さくなる (絶対値が大きくなる) ということと対応している。間隙水圧が正値となることはサクシオンが消滅することを意味している。このことを読者は頭に入れておいてほしい。

圧力を水頭で表記する場合がある。圧力の次元は  $[ML^{-1}T^{-2}]$  であるのに対して、圧力水頭の次元は  $[L]$  であるが、本講座では圧力と水頭は同じ意味で使われている場合がある。

保水とは不飽和土が間隙水を保持することを意味し、保水特性は水分特性曲線によって定量的に評価される。

透水とは不飽和土中を間隙水が流れていくことを意味し、透水特性は含水量あるいはサクシオンの関数として表される透水係数によって定量的に評価される。保水特性と透水特性を合わせて浸透特性という語を用いることにする。すなわち、浸透特性という語によって、水分特性曲線と不飽和透水係数～含水量 (不飽和度) 関係を包含することになる。

水分特性曲線のヒステリシスを議論するとき英語の drying と wetting に対応する日本語としては排水 (乾

表-1.1 講座「不飽和土・不飽和地盤」の内容

掲載号	タイトル	著者 (敬称略)
第1回	第1章 講座を始めるにあたって	北村良介 (鹿児島大学)
	第2章 不飽和土の保水特性	西村拓 (東京大学) 西村友良 (足利工業大学) 北村良介 (鹿児島大学)
第2回	第3章 不飽和土の透水・透気特性	杉井俊夫 (中部大学) 神谷浩二 (岐阜大学) 阿部廣史 (長野高専)
第3回	第4章 不飽和地盤の調査と浸透特性値の計測	竹下祐二 (岡山大学) 小松満 (岡山大学)
第4回	第5章 不飽和地盤の調査事例	小松満 (岡山大学) 西村拓 (東京大学) 竹下祐二 (岡山大学)
第5回	第6章 不飽和土の圧縮・せん断特性に関する室内試験方法	加藤正司 (神戸大学) 西村友良 (足利工業大学) 豊田浩史 (長岡技術科学大学) 阿部廣史 (長野高専)
第6回	第7章 不飽和土・不飽和地盤の数値シミュレーション	北村良介 (鹿児島大学) 酒匂一成 (立命館大学) 荒木功平 (株) ダイコンサルタント) 宮本裕二 (鹿児島県)
	第8章 講座を終えるにあたって	北村良介 (鹿児島大学)

燥も同義)と吸水 (湿潤も同義)を用いることにする。

本講座は、表-1.1に示されるように8章から成り立っている。本講座では、「飽和土」という語は土要素 (供試体) に対して用いられ、「不飽和地盤」という語は種々の不飽和土からなりたち、初期条件・境界条件を有する地盤 (フィールド) に対して用いられる。2章 (不飽和土の保水特性) ではサクシオン物理的意味、サクシオンの計測法、得られたデータの解釈について述べる。3章 (不飽和土の透水・透気特性) では保水特性と表裏の関係にある透水特性、透気特性を明らかにするための試験装置、計測法、得られたデータの解釈について述べる。4章 (不飽和地盤の調査と浸透特性値の計測、5章 (不飽和地盤の調査事例) では、不飽和地盤の保水・透水特性を明らかにするための試験装置、計測法、得られたデータの解釈について述べる。6章 (不飽和土の圧縮・せん断特性) では各種試験法と得られたデータの解釈について述べる。7章 (不飽和土・不飽和地盤の数値シミュレーション) では、数値力学モデルを用いて不飽和土・不飽和地盤の保水・透水・圧縮・せん断特性をコンピュータの中で再現する手法 (地球シミュレータと同じ考え方) について述べる。8章 (終わるにあたって) では、全体をまとめている。