

# 学問としての土質力学

## 1.1 土質力学の生い立ち

日本で農業が行われるようになったのは、弥生時代（紀元前 10 世紀頃～紀元後 3 世紀）といわれている。狩猟を生活の糧とした時代から、農耕が始まり、作物の栽培に移るに連れて集落が形成され、水路や堰などの今で言う建設工事が始まった。その時の経験は、植物の生育母体としての土については、現在の農学部の土壌学に、その周辺の建造物は農業土木と、我々工学系に分かれて発展し、住居環境は建築学へとそれぞれの学問分野に辿り着いている。一方、18 世紀後半には動力源としての地下資源の調査や発掘が始まり、後に産業革命と呼ばれた大きな転換期が訪れた。これらの地層に関係する知識は理学部の地質学へと進んだ。土質力学はその当時は姿形すら無かったが、数学、物理などの多くの先人の発想や理論的、半理論的な見識が積み重なって、本書で紹介する土質力学、地盤工学と呼ばれる教科として今日に至っている。この分野が体系化されて今日に至るスタート点は、やはり土質力学の父と呼ばれる Karl Terzaghi（カール テルツァーギ）が著書「Erdbaumechanik」を発刊した 1925 年からと考えて良い。本書中にも色々な先人の名前が登場するが、Terzaghi の卓越した貢献度は誰もが認めていると言って過言ではない。

## 1.2 土質力学の立ち位置

現在、著者らが所属するこの学問分野を代表する学会名称は、公益社団法人地盤工学会と称している。この名称は設立当時からのものではなく、1949 年に国際土質基礎工学会の日本支部に相当する「日本土質基礎工学委員会」として発足している。1954 年に「土質工学会」として設立され、1958 年に社団法人化し、1995 年に「社団法人地盤工学会」に名称変更、2010 年に現在の「公益社団法人地盤工学会」となった。この名称変更と併せて、教科書も土質力学、土質工学、地盤工学、地盤環境学等々と混在しているので、新たに勉強する将来の地盤技術者の立ち位置を明確にするためにも整理してみたい。

まず、学会から発刊されている地盤工学用語辞典には、地盤工学とは次のように示されている。「地盤および材料としての土や岩、さらに人工的な地盤材料を含めて、それらを取り扱う学問分野。土に関する工学的問題について、土の物理化学的な性質や力学的な性質を基に、力学や水理学などの諸原理を応用する学問体系を土質力学という。土の化学的性質を調べる土壌学、歴史や成因を調べる地質学と異なり、土質力学の知見は構造物や基礎の設計・施工に必要な土質工学およびその一分野である基礎工学の基本となる。特に対象を岩石や岩盤に限ったものを岩盤力学という。これらを総称して地質工学と呼ぶこともある。」とある。用語辞典の内容にもあるように、この学会は建設工学系の出身者だけのものではなく、社会基盤を構成する大型構造物は土木系が主体となるが、農学部の分野でも治水など大掛かりの技術開発、研究を進めている。高層ビルや一般住宅の基礎には建築系の技術者も関係する。理学系の地質学の分野の知識は、それ以外が定量的な結論を導こうとする中で、歴

史的な背景に基づいて定性的な見解から地すべりや土砂崩れの対策を、温暖化等による地球全体の環境変化の影響などを担っている。このように多くの分野の技術者、研究者が地盤工学に関連する知見を積み重ねて、安全で安心な社会基盤の構築を目指しているのである。

### 1.3 土質力学の名称について

土質力学と土質工学とは、わずか一字の違いではあるが、その意味するところの差異は大きい。土質力学は Soil Mechanics の訳語として生まれた日本語である。土質工学はそれより後に生まれた造語で、一般には Soil(s) Engineering に対応するものであるが、英語圏ではこれに近いものとして、Earthwork Engineering, Foundation Engineering, Geotechnical Engineering, Subsurface Engineering などの表現がある。もっとも Foundation Engineering は基礎工学と訳され、構造物の基礎としての土と地盤とを包含するものである。Geotechnical Engineering は、土質工学、基礎工学、岩盤工学、土木地質学、氷雪工学までを含む広い範囲、いわば土木建設に関連する土、岩、水の問題すべてをひっくめて指す比較的新しい表現である。同じ趣旨で土質力学の範囲を広げ、Geomechanics という語も使われている。我が国では Geotechnical Engineering に対して地盤工学という言葉が使われてはいるが、これはむしろ Subsurface Engineering に近い語感であると 40 年ほど前には考えられていたが、前述したように、1995 年に我が国の土質工学会は地盤工学会 (The Japanese Geotechnical Society : JGS) に名称変更され、1997 年に国際土質基礎工学会は国際地盤工学会 (International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering : ISSMGE) に変更された。この国際学会の日本語訳が的確な表記かはわからないが、このような変遷を経て現在に至り、Geotechnical Engineering が多用されるようになった。

### 1.4 土質技術者とは

ところで、土質力学はサイエンスであり、土質工学はエンジニアリングである、といわれる。両者に学の子がついていることは、日本人にとって誠に不幸なことといわねばならない。サイエンスは真理を探究する学問であるのに対し、エンジニアリングは与えられた土俵の中でベストを追求する術であるというように両者の目的には本質的な違いがあるからである。したがって、エンジニアリングの答えは必ずしも、普遍性のある真理であることを必要としない。与えられた工期、工費、その他の境界条件の中で、一番目的に合致し、一番安全で、一番安いもの、すなわち、ベストを見いだし、これを作りあげる。よって、土質工学は「術 (art)」であると、この道の巨匠たち (前述したように本書の中でもその一部の方々のお名前は掲出している) は口をそろえる。彼らの語る術とは、理論と論理的な考え方を勉強した後、豊富な経験が知識の空隙をみだし昇華して、初めて体得できる熟練のわざのことである。これによりの確な学理的判断を下すのが術の奥儀というものであって、巨匠たちはもとより術というものが完全で万能であるなどといっているわけではない、土質工学の仕事では何が主役となり、したがってどこに人間の努力を結集すべきであるかの問題として、術の重要性を説いているのである。昨今話題となっている **STEAM教育** (科学・技術・工学・芸術・数学の 5 つの英単語の頭文字を組み合わせた造語で、科学 (Science), 技術 (Technology), 工学 (Engineering), 芸

術・リベラルアーツ (Arts), 数学 (Mathematics) の 5 つの領域を対象とした理数教育に創造性教育を加えた教育理念と分野横断的な学び指す) を 100 年も前から実践しているかのようである。

さて、鋼やコンクリートの性質は比較的単純であり十分に定義できるものであるが、大学の土木教育では、この種の材料にのみ適用できる法則を教えることに重点が置かれる。このような教育を受けると、工学に関連する問題はすべて演算的な仮定に基づき計算により求めることができるという幻想を抱いてしまう。しかし、材料が鋼やコンクリートではなく、土ということになると、理論の全能性は失われてしまう。まず、第一に、自然状態の土は均一ではなく、第二に、土の性質は厳密な理論的取扱いをするには複雑すぎる。第三には、よく出会う問題のいくつかは、近似式さえ成り立ち難い条件のものである。この 3 条件があるために、土を扱う問題を数学的にうまく処理できる可能性は極めて限られたものとなる。したがって、ここで紹介する土の力学では、理論的には正しくとも、その計算結果は概略推定値の域を出るものではないと考えるべきである。

自然地盤は決して均質ではなく、土の性質は地盤内の点から点へと変化する。それにもかかわらず、我々が知り得るのは、試料が採取された数少ない点における土の性質だけである。土層の性質が十分に把握できないことがどんな結果になるかを知るためには、我々が予想した結果と、実際のケースで直接観測した結果とを、数多く比較してみなければならない。このため土質・基礎工学に関連する仕事では、まず十分に理論的な勉強をして誤差をもたらし得る原因に目を開くことが必要である。

勿論、これらの知識を活かすためには、実務者は現場における観察と測定とが重要となる。現場観測は昔の技術者たちも試みたものであるが、現在は昔のものよりはるかに優れた観測機器・技法が開発されている。これを駆使しながらも、やはり自らの目視観察も怠ってはならないのである。経験を重ねても、重ねても現場に出向き、歩き回り汗をかく、それが土質技術者に課せられた任務であると考えている。

# 土の基本的な性質

## 2.1 飽和土と不飽和土

土 (soil) が寄せ集まって地盤 (ground) として形成されているが、**地下水面** (groundwater table) を基準として、その存在位置により Fig.2.1 に示すように区分されている。我が国は、欧米諸外国と比較して**地下水位** (groundwater level) が高く、平野部で地表面から 1～数 m のところに地下水面が存在する。よって、地下水面以下にある地盤の隙間は水で満たされた飽和状態にある。これを**飽和土** (saturated soil) と呼ぶ。地下水面より上では、その近傍では**毛管現象** (capillarity) により飽和土に近い状態の土も存在するが、ここでは、地下水面より上方の土を**不飽和土** (unsaturated soil) と区分する。図には、後述する土を単位体積重量で表現するときの水中単位体積重量 (submerged unit weight) も示されている。これは地下水面下にある土が浮力を受けている時の重量を示し、土質力学を理論的に学ぶ上では重要な表記である。

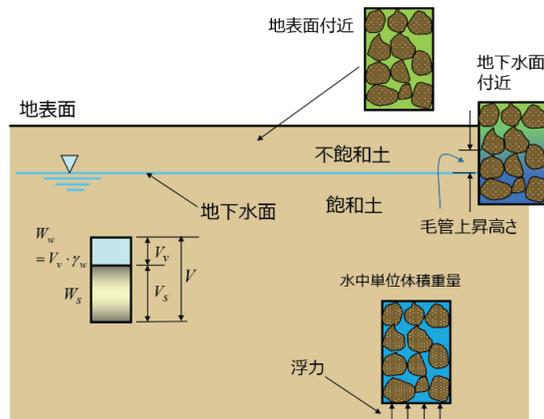


Fig.2.1 飽和土と不飽和土

## 2.2 土の構成図とその状態量の表示方法

土の実際の状態を模式的に示したのが Fig.2.2(a) である。同図の (b) には、それを更に単略化した土の構成図を示した。土粒子 (soil particle) が集合体を形成し、その空間を**間隙** (void) と呼び、間隙の中には空気と水が存在する。構成図は、三つ相に分けられ**三相体** (three-phase body) として存在するため取り扱いが難しくなる。この構成図に基づいて、土の性質を数的に把握することが行われており、ここで得られる数値が土や地盤の挙動を把握する上で重要であり、ここで躓いてはならない。

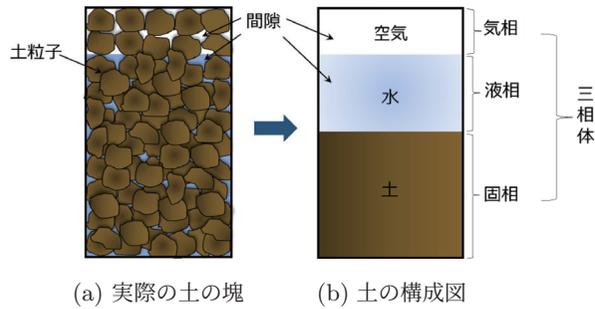


Fig.2.2 土の模式図と構成図

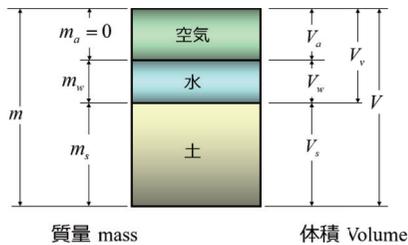


Fig.2.3 土の構成図の記号付け

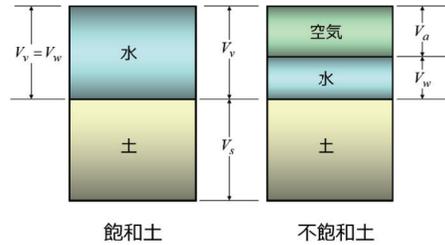


Fig.2.4 飽和土と不飽和土の構成図

Fig.2.3 に構成図を質量と体積に分けて示している．土塊全体の質量を  $m$ ，体積を  $V$  で表現し，土粒子分，水分，空気分とに，それぞれ下付き文字（添え字） $s = \text{solid}$ ， $w = \text{water}$ ， $a = \text{air}$  をつけて区分している．間隙部分は  $V_a$  と  $V_w$  を合わせて  $V_v$  で表現していることに注目すること．空気にも厳密には質量があるが，土粒子分や水分に比べて，その質量は僅かであるので  $m_a = 0$  として取り扱う．Fig.2.4 は，2.1 節で紹介した飽和土と不飽和土の構成図である．間隙部分から水分が除かれて空気分だけになったなら，それは乾燥土であり，不飽和土の一つの形態である．

- (1) 間隙比  $e$  (void ratio : イーの小文字で斜体) 土質力学で多用される重要な値である．この値が大きいと土塊の締まり具合は緩い状態となり，次式で表される土の体積を基準として土の間隙部分が占める割合であり，土の圧縮や透水性に関連する．

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 \quad (2.1)$$

- (2) 間隙率  $n$  (porosity : エヌの小文字で斜体) 土の全体積を基準として土の間隙部分が占める割合を表し，土の圧縮や透水性に関連するのは間隙比と同様である．

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 (\%) \quad (2.2)$$

- (3) 飽和度  $S_r$  (degree of saturation : 共に斜体でエスの大文字とアールの小文字で下付き文字) 土の間隙部分を占める水分の割合を示す． $S_r = 0$  は乾燥土（不飽和土）， $S_r = 100\%$  は飽和土で，飽和度  $S_r$  はこの間にある．

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 (\%) \quad (2.3)$$

ここまでの  $e$ ， $n$ ， $S_r$  は体積に関する相関係を示すもので，直接に測定することができない．その求め方は後で紹介する．