

垂直に切り取った掘削面にかかる応力について

- ランキン式（主動土圧）

$$P_A = (\gamma Z + q) \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

：土の単位体積重量（=1.7と仮定）

：内部摩擦角（=30°と仮定）

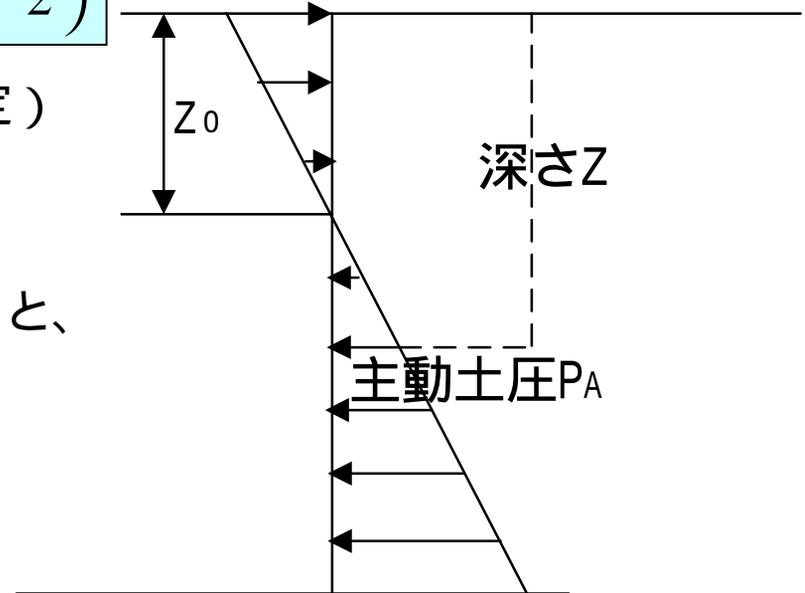
粘着力 $C=0.1\text{kgf/cm}^2=1.0\text{tf/m}^2$ とすると、
主動土圧 $P_A=0$ となる深さ Z_0 は、

$$0 = (1.7 \times Z_0 + 0) \tan^2 30 - 2 \times 1 \times \tan 30$$

$$Z_0 = (2 \times 1 \times \tan 30) / (1.7 \tan^2 30)$$

$$Z_0 = 2.04$$

したがって、 $\phi=30^\circ$ の砂質土において
約2mの掘削面は垂直に維持される。



不飽和土



第1章 不飽和土とは

1.1 不飽和土と飽和土

土が完全に乾燥していれば、土質力学は不要だといわれてきた。これは土の間隙内に水が存在することにより、土の性質が複雑になることを比喻したものだが、飽和土という2相系の材料に、さらに空気が混入して3相系の材料になると、その性質がさらに複雑なものとなることは想像に難くない。不飽和土の性質を、簡単な例でみてみよう。

1.1.1 子供の砂遊び

不飽和土と飽和土の性質の違いを明瞭に体験できる例は、子供の砂遊びである。砂山を築いてトンネルを掘るときに、子供は砂に水を加えて、砂山の表面を叩きながら築きあげる。こうして築かれた不飽和状態の砂山の中には、トンネルを掘ることができる。砂の間隙の水分が負の間隙水圧をもち、砂に見掛けの粘着力を与えているおかげである。

また、波打ち際で砂遊びをするときには、砂山が波を被るたびに崩されていく。これは砂が波を被り飽和されると、負の間隙水圧を消失し、見掛けの粘着力もなくなり、砂が流動化するためである。

砂場のトンネルと同じ現象は、砂の堆積場においても

見ることができる。砂が湿潤した状態では、砂を掘削して高さ1~2m程度の垂直な壁を作ることができる。しかし、砂が乾燥したり、雨が降ると、砂の壁は崩れて緩い傾斜の斜面に変わる。これも、湿潤状態の砂には、間隙に負の水圧をもつ水分が存在する影響である。

地下水面以下の砂質地盤にトンネルを掘削する場合には、トンネル切羽の自立を助けるために、圧気工法を採用することがある。圧気により切羽に地下水が浸透してくるのを防ぎ、また切羽の砂を不飽和化することにより、砂は見掛けの粘着力をもち、切羽の安定に寄与することになる。

1.1.2 試料土はすべて不飽和土

一般に、水面下の地盤の土は飽和していると考え得る。しかし、そこから試料土を採取した途端に、その土塊は、不飽和土と化す。地盤内で作用していた荷重は解放され、水面からの深さによる静水圧も消失している。一見したところは飽和粘土ではあっても、試料内部には負の間隙水圧が発生しており、不飽和土化している。この粘土試料の一軸圧縮強さは、飽和粘土の非排水せん断強さを求める基本的な方法であるが、試料土は不飽和土となっていて、内部に負の間隙水圧が発生している。この負の間隙水圧により一軸圧縮強さも影響されることになる。

1.1.3 自然斜面内の地下水

斜面内で地下水が存在するようなところでも、水みちを通って地下水が流下しているような斜面では、水みち沿いでは飽和していても、それを外れた部分では不飽和

状態である。

また、切取り工事によって造成された斜面では、切取り直後は応力解放により斜面内に負の間隙水圧が発生して、斜面は安定しているが、降雨によって正の間隙水圧へと変わり、斜面は不安定状態へと向かうことになる。そして晴天になって浸透水が止まれば、斜面内は不飽和状態に戻っている。このような繰り返しが自然斜面内の間隙水圧の営みであり、斜面土は飽和と不飽和の間を行きつ戻りつしている。

1.1.4 飽和土と不飽和土の定義

Aitchison(アイチソン)¹⁾によれば、表-1.1に示すように、飽和度の面から飽和土・不飽和土と称するほかに、部分飽和・疑似飽和という状態がある。部分飽和は、飽和土の中に塊状に不飽和土部分が存在するものである。疑似飽和は、飽和度が100%あり見掛け上飽和しているが、間隙水圧が負であり、定義上飽和とはいえない。

表-1.1 飽和と不飽和の定義

水分状態	飽和度	間隙水圧	間隙空気圧	B 値
飽和	100	≥ 0	—	1
部分飽和	< 100	≥ 0	> 0	< 1
疑似飽和	100	< 0	—	1
不飽和	< 100	< 0	0	< 1

飽和土とは、飽和度が100%であるばかりでなく、間隙水圧が止であることが必要である。

また、Skempton(スケンプトン)によれば、地盤内の応力の増分 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_3$ による間隙水圧の増分 Δu は、

$$\Delta u = B(\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3))$$

によって表される。このとき、間隙水圧係数 B は飽和時に1であり、不飽和時には $B < 1$ となる。この性質を利用して、実験室内で飽和状態を確かめるために、 B 値の測定が行われる。

1.2 不飽和土に関連する現象

多くの場合、土が乾燥した状態で存在している乾燥した気候の国々では、土の乾燥による収縮沈下、湿潤による膨張隆起あるいは浸水による沈下など、不飽和状態における土中の水分の変化が、多くの工学的問題を提起している。

例えば、図-1.1²⁾に示すオクラホマ州立大学の寮は、鉄筋コンクリート4階建の建物が独立フーチングにより粘土地盤に支持されている。しかし、建設1年後には粘土地盤に直接支持された床は14 cm持ち上がり、B点柱は7.5 cm持ち上がり、C点の柱も0.5 cm持ち上がっている。この建物の基礎面は地表下4.2 mにあり、粘土はも

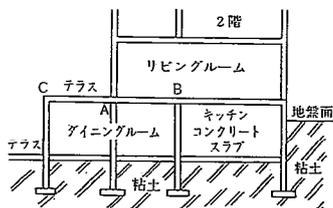


図-1.1 コードンホールの断面²⁾

とも乾燥して硬く頁岩状であった。地下水面は-15.2 mと深い。しかし、建物完成によって地表を覆ったために、粘土層が湿潤化して建物を持ち上げている。B点柱のフーチングは、A点柱のフーチングと同じ接地圧をもつように設計されていた。しかし、A点柱は構造上荷重が大きく、地盤内応力の影響範囲・応力値が大きいため、地盤土の膨張抑止効果が大きく、B点柱と差を生じたとみられている。このような膨張性粘土は、エジプト、イスラエル、南アフリカ、スペイン、南アメリカ、ベネズエラなどの乾燥地帯で問題になっている。

このような膨張性地盤では、建物を建てる場合にも、建物の影響により地盤粘土の含水比が変化しないように配慮する必要がある。そのため、杭基礎の場合にも、図-1.2のように、杭径よりも大きな穴を掘ってこの中に杭を立て込み、杭の先端のみを地盤に打ち込んでおく。床下の空気が杭の周囲にも流入するようにして、地盤粘土の含水状態が変化しないようにしている³⁾。

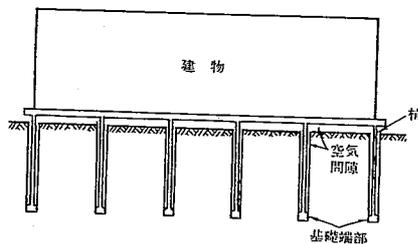


図-1.2 膨張性粘土上の建物³⁾

また緩く堆積した土が、水浸することにより大きな沈下を示すことがある。例えば、カリフォルニア州サン・オークイン・バレー (Sun Joaquin Valley) は、灌漑農業の盛んな所であるが、ここでは、地表沈下、破壊した水路、起伏する農場、傾いた建物や構造物等が多数みられる。この付近の水浸による沈下は通常1~2mであるが、所によっては、4.5mにも達している⁴⁾。

我が国においても、トレンチ掘削後の埋戻し土が、転圧が不十分なためその後沈下するのは、同じ理由によるものである。

地下水面の近くでは、表面張力により水は水面より高い位置まで吸い上げられて毛管水として存在する。そこでは土は飽和度は高いとはいえ、その間隙水は負の間隙水圧を持ち、不飽和状態である。その位置が地表に近い場合には、地表からの乾燥・湿潤の影響をうけ、間隙水圧は変動している。

冬季に地表が凍結し、土が0°C以下になると、毛管水が凍結して氷の固体となるため、表面張力の平衡が崩れ新たに地下水を吸い上げることになる。この繰返しにより凍結領域にはたくさんの氷が形成され、地表を押し上げる。このように凍上現象は不飽和土が凍結する際に間隙水の供給によって生ずる現象であるといえる。

参 考 文 献

- 1) Aitchison, G. D.: The Strength of Quasi-saturated and Unsaturated Soils in Relation to the Pressure

- Deficiency in the Pore Water, Proc. 4 th. Int. Conf. on SMFE., Vol. 1, pp. 135~139, 1957.
- 2) Parcher, J. V. and Means, R. E.: Soil Mechanics and Foundations, Charles E. Merrill Publishing Company, 1968.
- 3) Lambe, T. W. and Whitman, R. V.: Soil Mechanics, p. 7, John Wiley & Sons, Inc., 1969.
- 4) Lofgren, B. E.: Land Subsidence due to the Application of Water, USGS Publications, Reviews in Engineering Geology II. 1969.

第2章 不飽和土とサクシオン

2.1 不飽和土の有効応力

飽和土の変形と強度が、その土塊に作用する有効応力
に支配されることは、飽和粘土の有効応力の原理として
知られている。その有効応力は、全応力 σ より間隙水圧
 u を差し引いて得られるものと考えられてきている。

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.1)$$

不飽和土の場合にも、乾燥した地域の盛土・アースダ
ム・斜面の安定、舗装板下の材料の安定性を考えるうえ
で、不飽和土に対する有効応力原理の適用が考えられて
きた。そして Bishop (ビショップ)¹⁾により次の有効応力
式が提示されている。

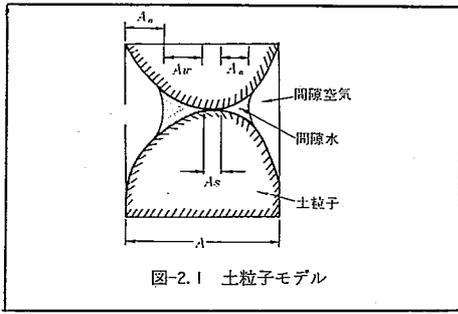
$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2.2)$$

ここで、 u_a = 間隙空気圧、 u_w = 間隙水圧であり、 χ は飽
和状態では $\chi=1$ となり、飽和度が低くなれば χ は小さ
くなり、乾燥状態では $\chi=0$ となる。

上の有効応力の式は、図-2.1 のモデルを用いて簡単に
説明できる。土粒子の全面積 A のうち、土粒子が接触す
る面積を A_s 、間隙水の占める面積を A_w 、間隙空気の占め
る面積を A_a とすれば、

$$A = A_s + A_w + A_a$$

力の釣り合い条件より、



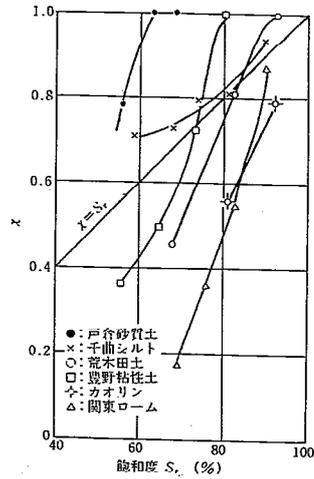
$$\begin{aligned} \sigma' A &= \sigma_a A_a - u_w A_w \\ \sigma' &= \sigma - u_a A_a / A - u_w A_w / A \\ \sigma' &= \sigma - (1 - A_s / A) u_a + (u_a - u_w) A_w / A \end{aligned}$$

$A_s / A = a$, $A_w / A = \chi$ とおけば

$$\sigma' = \sigma - u_a (1 - a) + \chi (u_a - u_w)$$

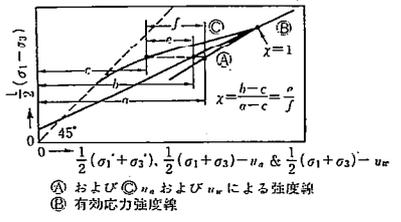
をうる。a は実質的に 0 と考えて差支えないとされている。

このように χ は理論的には飽和度に対応するものであるが、乾湿の繰返し・粘土鉱物などに関連する実験定数である。 χ はサクシオン ($u_a - u_w$) が、いかに粒子間の有効応力に寄与するかを表すものである。飽和に近い状態では、サクシオンは直接有効応力に寄与するものと考え、乾燥が進むとサクシオンは大きくとも有効応力には関係しないと考えればよい。そして、実験的に χ は図-2.2 のように示される。すなわち、飽和度 90% 以上では $\chi = 1$ と考える土と、飽和度が低下すれば χ の値も



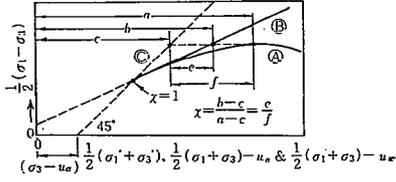
急激に小さくなる土と 2 種類あることがわかる。

χ の値を決定するためには、不飽和土の強度あるいは体積変化挙動を飽和土のそれに一致させるように決めている。 χ の値を求めるためには、三軸圧縮試験、サクシオン一定三軸圧縮試験、一軸圧縮試験によって決めることができる。図-2.3 に示すように、それぞれの方法に応じた図を描き、 χ の値を求めうる。いずれも飽和土について得られた強度線⑧に対して、不飽和土の u_w による強度線および u_a による強度線が一致するように、 χ の値を決めようというものである。



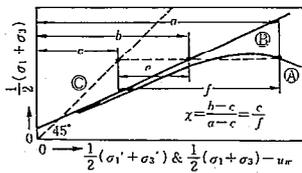
Ⓐ および Ⓒ u_w および u_w による強度線
Ⓑ 有効応力強度線

(a) 一般的三軸圧縮試験



Ⓐ u_w による強度線
Ⓑ 有効応力強度線
Ⓒ $(σ₃ - u_w) = \text{一定の線}$

(b) サクシオン一定三軸圧縮試験



Ⓐ u_w による強度線
Ⓑ 有効応力強度線
Ⓒ $(σ₃ - u_w) = 0$ の線

(c) 一軸圧縮試験

図-2.3 圧縮試験による χ の決定法²⁾

このように、 χ の値は不飽和土のみの試験から決定できるものではなく、飽和土の試験も必要である。したがって、 χ の値を決定するには多くの手数を要し、これを求めようとすることは実用的ではない。しかしながら、土の状態に応じて、おおまかな χ の値を頭の中に描いて、不飽和土の力学的挙動を理解することは大切なことである。先述のように、一部の土では、飽和度 90% 以上では $\chi=1$ であり、間隙水圧が負であるというだけで、実用的に飽和土と同じように考えることができる。

2.2 サクシオンと負の間隙水圧

前節の有効応力式のなかで、サクシオンは間隙空気圧と間隙水圧との差であることを示したが、一般的には間隙空気圧は大気圧に等しく 0 であると考えうる。不飽和土の間隙水圧は負であることと考え合わせると、サクシオン ($u_a - u_w$) は一般に間隙水圧の負号をとったものに等しい。

不飽和状態の間隙水は、図-2.4(a)に説明するように、土粒子接点において、土粒子吸着水の間にくさびを形成し、表面張力により空気圧と釣り合っている。その状態は図-2.4(b)の細いガラス管の中のメニスカス直下の水と同じ状態にある。

ガラス管の半径を r 、毛管上昇高さを h 、大気圧を u_a 、表面張力を T 、管の表面との接触角を α とすれば、

$$\pi r^2 \cdot u_a = \pi r^2 \cdot u_w + 2\pi r T \cos \alpha$$

$$u_a - u_w = (2T \cos \alpha) / r$$

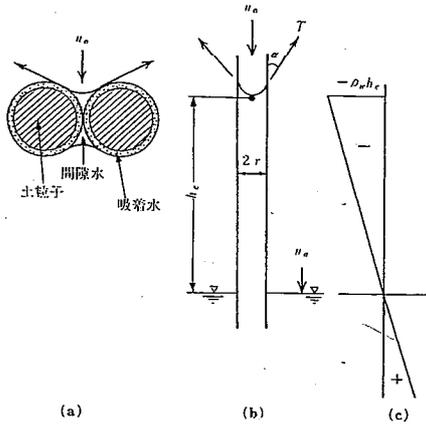


図-2.4 毛管現象

これは毛管上昇高さに等しい。水の密度を ρ_w とすると、

$$u_a - u_w = \rho_w h_c$$

$$h_c = (2T \cos \alpha) / \rho_w r \quad (2.3)$$

したがって、大気圧下で $u_a = 0$ とすれば、 $u_w = -\rho_w h_c$ と負の圧力を持ち、図2.4(c)に示す分布となる。地下水位の上では、毛管水により飽和度は100%に近いが、間隙水圧は負であり、不飽和状態にある。

通常、サクシオンの大きさは、pF値で表す。圧力を cm 単位の水柱の高さで表し、その常用対数をとっている。

$$pF = \log_{10} h_c$$

Schofield(スコフィールド)³⁾が提唱したpFのpはpH(Potential Hydrogen)と同じ対数を表し、Fは自由エネルギーを表している。

そしてサクシオンは、土が飽和しているpF=0から、乾燥状態のpF=7まで存在する。植物はpF=4.2以上では、土中より水分を吸い上げえないといわれ、これを農学ではしおれ点と呼んでいる。

2.3 pFと化学ポテンシャル

サクシオンとか負の間隙水圧は、もともと土中水の化学ポテンシャルの形をかえた表現であり、pFも化学ポテンシャルの実用的尺度として定義されている⁴⁾。化学ポテンシャルは土中水のエネルギー状態を表すものであり、含水比が土中水の量を表すのに対し、土中水の質的状态を表すものといえる⁵⁾。

土中水の化学ポテンシャルを低下させる要素としては、一つは土粒子間の吸着力や表面張力による圧力低下であり、マトリックポテンシャルまたは毛管ポテンシャルと呼ばれる。これは図-2.4で説明している。いま一つは、溶質によって低下するもので、浸透ポテンシャルまたは溶質ポテンシャルと呼ばれる。図-2.5に示すように、半透膜を介して左の容器に純水

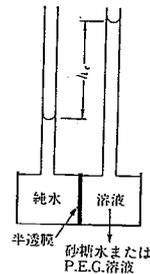


図-2.5 浸透ポテンシャル

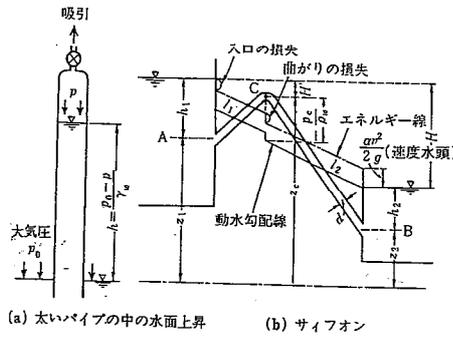
を、右の容器に砂糖水またはポリエチレン・グリコール溶液を入れるとき、溶液は純水を吸引して濃度を薄める働きをする。このとき左右の容器内では圧力差が生じる。これが浸透ポテンシャルである。土中水の化学ポテンシャルは、これらマトリックポテンシャルと化学ポテンシャルの和により表される。

土中水のサクシオンは、厳密にはこのような熱力学的エネルギー概念に基づく化学ポテンシャルとして理解することが必要であるが、実用的にはマトリックポテンシャルの符号を換えたものとして、単にサクシオンとして理解しておいても問題はない。

2.4 巨木に水がのぼる

植物では根の先端から水を吸収し、葉の表面から水を蒸散している。この水は道管と呼ばれる直径数ミクロン～数百ミクロンの細い管を通して、幹の中を送られている。樹木の根と葉の間には大きなポテンシャルの差があり、数十mという高い木の上まで水を送ることができる。

通常、水が負圧をもつという、サクシオンポンプ、サイフォンを思い浮かべて、負圧は絶対圧0以下にはなりえないと考える人が多い。図-2.6(a)に示すように、パイプの中の空気圧 p を低下させればパイプの中の水が上昇する。しかし、 p は絶対圧0以下にまで低下することはないので、水の上昇は大気圧 p_0 による水頭(約10m)を超えることはない。したがって、サクシオンポンプの



(a) 太いパイプの中の水面上昇 (b) サイフォン

図-2.6 サイフォン^①

揚程は10m以下である。

サイフオンの場合を図-2.6(b)に示すが、管路における入口の損失、速度水頭、管路の曲げ損失を考慮すると、図示のような動水勾配線を得る。 p_c/ρ_w が10mを超えると管内の水が流れることはできない。水中に溶けている空気が分離して管内にたまり、水流が分断されるためである。

しかし、樹木の中の道管では、上下で数十気圧のポテンシャル差を生じており、樹液上昇に必要なポテンシャル差が存在することが実証されている⁷⁾。この道管は、広葉樹では直径20～800 μ m、長さ数cm～数mのものが軸方向に連続して合体している。幹の上下にそれぞれ反対側から水平に半分まで切り込みを入れても樹液は上昇している。水は切断部を回避して送られている。道管はマ

トリックポテンシャルばかりでなく、浸透ポテンシャルによっても水を送る能力を備えているとみられる。

また、この道管内に気泡が入り込んで水の連続性が切れるのではないかの疑問が投げかけられているが、気泡は道管内に隔離され、全体の通水をふさぐことはないことが確かめられている。

このように樹木の中では、道管および細胞内の化学ポテンシャル差により、数十mの高さの枝葉まで水が送られるのである。

土中の間隙の水も、樹木の道管中の水と同様、表面張力と凝集力で間隙に吸着しており、pF7までの高い負圧を有している。水が剥離・蒸発するためには、空気中の蒸気圧が水の飽和蒸気圧以下に低下することが必要である。このことについては、後述の湿度とサクシオンの関係を参照されたい。

2.5 サクシオンとコンシステンシー

土のコンシステンシー測定時には、土は不飽和状態にある。このとき、いかなるサクシオンを保持しているかを調べた例⁹⁾を図-2.7に示す。自然土の乾燥・湿潤を繰り返したときの水分保持曲線は、含水比30%以下の範囲で、わずかなヒステレシスをもつループを描いている。試料土をスラリーより乾燥した場合には、図の右端より先のループに漸近する曲線SCとなる。これに対し、液性限界試験時には、図中の破線TBの上に分布する。これが先のループと交わる所B点に塑性限界が存在する。こ

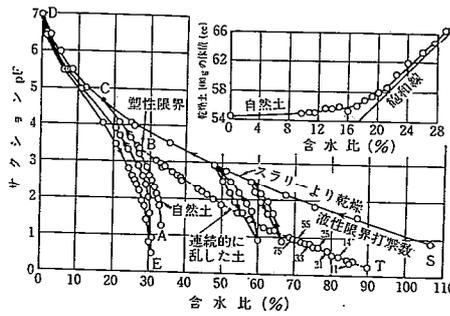


図-2.7 サクシオンとコンシステンシー⁹⁾

れは液性限界76%、塑性限界27%であることを示している。この土の収縮特性が、図の右上に示されている。自然土を乾燥した場合の体積変化が示され、乾燥時一定の体積に漸近する。これを飽和させたときの含水比が収縮限界であり、その値は約17%である。下の図でいえば、C点付近となる。しかし、下の図では、いったんDまで乾燥し、再び湿潤させるとE点に達し、その含水比は30%である。乾燥した土を再湿潤するときに体積膨張がないとすれば、このE点の位置が収縮限界に対応するはずである。この重粘土では再湿潤時かなりの体積膨張があったことになる。通常の土では、塑性限界=収縮限界であることが多い。その結論は今後のデータの蓄積に待つとしても、乾湿の繰返しによる水分保持曲線は、およそ塑性限界以下の範囲での話であり、通常使われていない収縮限界が水分保持特性を考えるうえでは大切な指

5.5 不飽和砂の強度

乱さない成田砂の飽和状態と不飽和状態の三軸試験結果を図-5.14に示す。飽和土については排水試験、不飽和土については空気圧制御によるサクシオン一定の排気・排水試験を行っている。図の結果は、飽和砂は側圧0.52 kgf/cm²で排水強度0.93 kgf/cm²を得ている。不飽和土では、側圧0.52 kgf/cm²に加えて、サクシオンを作用させ、平衡状態に達するのを待って圧縮している。横軸に側圧とサクシオンの和、縦軸に軸差応力の1/2をとって示している。図の斜線部の縦距が不飽和化による強度増分である。

不飽和土は飽和土よりわずかに強度が増加し、また、サクシオンの大きさに関係なく、ほぼ一定の強度増を示している。図では約0.1 kgf/cm²の強度増であるが、これは側圧を増加させたときにも変化はなく、

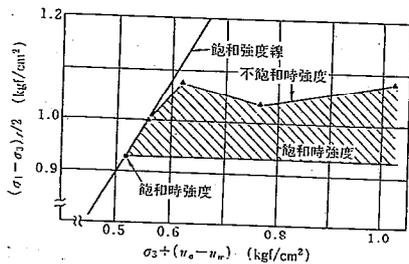


図-5.14 飽和および不飽和砂の三軸排水およびサクシオン一定試験

ほぼ一定である。したがって、不飽和土の強度線は、飽和土の強度線をこの0.1 kgf/cm²だけ上方に移動したものとなり、φ'は一定であるが、不飽和土でc'が生ずる。

また、図示の場合、側圧が大きいため不飽和化に伴う強度増分の割合は小さい。しかし、側圧が小さい所では、増分の占める割合が大きくなる。それゆえ、砂質土の不飽和化による強度増は、風化砂質土斜面の浅層でのすべり、トンネル切羽の安定、垂直切取り壁の安定等の問題で、大きな影響をもつことになる。本来、c'=0の砂質土に、わずかでもサクシオンによる見掛けの粘着力が生じる影響は大きい。

参考文献

- 1) Ladd, C. C. and Lambe, T. W.: The Strength of Undisturbed Clay Determined from Undrained Tests, ASTM, STP 361, Laboratory Shear Testing of Soils, pp. 342~371, 1963.
- 2) Kimura, T. and Saitoh, K.: The Influence of Disturbance Due to Sample Preparation on the Undrained Strength of Saturated Cohesive Soil, Soils and Foundations, Vol. 22, No. 4, pp. 109~120, 1982.