

【土の締固め】

(1) 飽和土 (乾燥砂) と不飽和土

土は土粒子と土粒子の間隙の中の水と空気との3つの要素で構成されている。土の指示的性質でそのことを学んで以来、その後の透水・圧密では、間隙が水で満たされた「飽和土」を中心に議論されてきた。また、土の強度と破壊理論でも、間隙に空気が混ざっている「不飽和土」については、ほとんど議論されてこなかった。それは、モール・クーロンの破壊規準を美しく満足する(すなわち直線となる)ような「理想的な土」は、間隙がすべて水で満たされている「飽和土(砂も粘も)」か、間隙がすべて空気で満たされている「乾燥砂(注: 乾燥粘土は自然界に存在しない)」に限定されるからである。

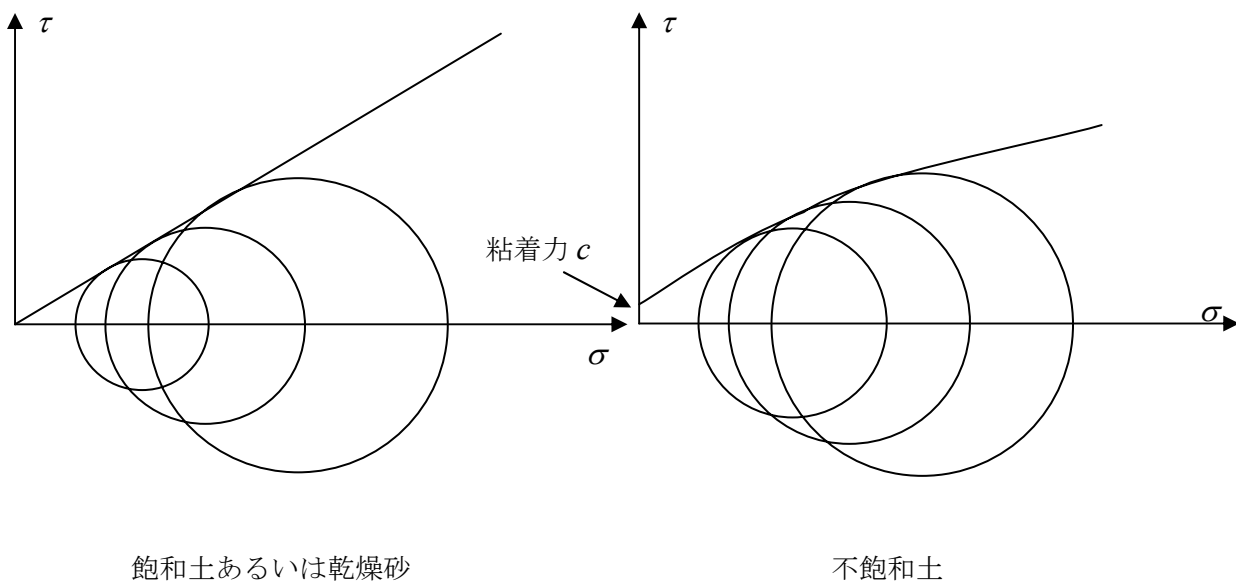


図1 飽和土と不飽和土のCU試験時のモールの応力円

一般に、不飽和土の場合、低い拘束圧の場合には、「サクシオン(負圧): ※次節で説明」の効果により飽和土に比べて顕著にせん断強度が増大するため、粘着力が発生する。しかし、拘束圧が高くなると、相対的にサクシオンの効果は小さくなるため、モールの応力円の包絡線は「上に凸」の曲線になることが多い。実務上は、この程度の曲線ならば、無理矢理、直線近似してしまい、強度定数  $c, \phi$  を決めてしまうことが多い。

(2) 不飽和土におけるサクシオン

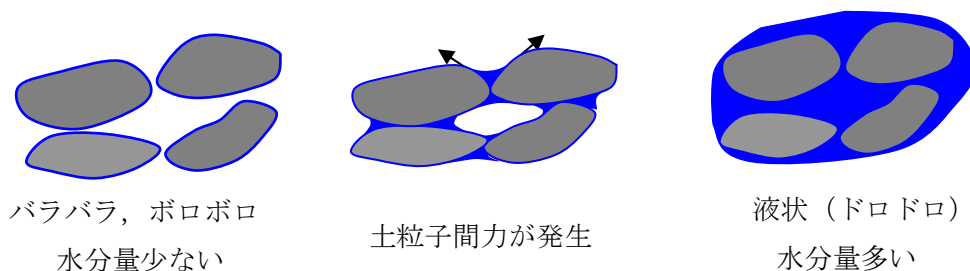


図2 含水量による土粒子の付着の違い

粘土の塑性限界、液性限界を勉強した時に、粘土のコンシステンシーは土粒子と水との混合割合によることを理解したが、粘土よりもっと粒径の大きな土であっても、この土粒子と水と（正確に言えば空気と）の混合割合により、変形やせん断の性質が変わる。その原因は、土粒子間に適度に付着した間隙水の表面張力による。中央の図のように、土粒子間の付着水にメニスカスが出来ている場合には、水には表面張力が作用している。右図のように、水面に細いパイプを立てた場合には、毛管作用によりパイプ内の水面は上昇する。これはパイプ内に出来たメニスカスにより、水に表面張力  $T(N/m)$  が生じるために、水圧と大気圧との間に圧力差が生じることによる。すなわち、パイプ内で考えると、

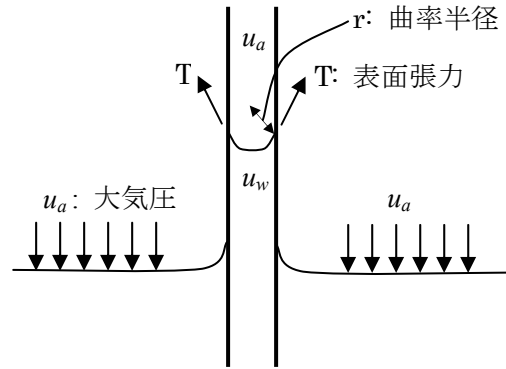


図3 細いパイプ内の毛管水

$$u_a - u_w = \frac{2T}{r}$$

となり、明らかにパイプ内の水圧は大気圧 (=0) より低くなり、水圧は負の圧力（負圧）となる。このような圧力差が、土粒子に付着した間隙水と空気圧との間に生じる場合には、間隙水は土粒子同士を吸引する力を発生することになる。実際の土粒子間の付着水のメニスカスは、パイプ内よりも複雑な形状であるが、原理は同じである。この間隙空気圧（一般には大気圧）と間隙水圧の差を「サクション」と呼ぶ。

### (3) サクションと土の締固め

海辺の砂浜でトンネルが掘れるような丈夫な砂山を作るコツは、いかに丁度良い具合に砂を湿らすかであったはず。湿らす程度が少ないとバラバラになるし、湿らせすぎるとドロドロになってしまう。適度な湿り気を持たせて締固めることによってできた土塊において、その土塊を構成するそれぞれの土粒子間の結合力は、主にサクションによって成り立っている。サクションは土粒子間のメニスカスの形状に依存するので、土粒子の粒径、土粒子間の距離（すなわち詰まり具合）、そして水分の量が密接に関連しあって、結合力であるサクションが決まる。そのため、サクションは土の締固めにとって、非常に重要である。

### (4) 最適含水比と最大乾燥密度

締固め土塊の粒子間に働くサクション云々の理屈はともかくとして、実務ではより高性能な締固め土塊をつくらなければならない。高性能な土塊とは、硬く（すなわち剛性が高く変形性が小さい）、壊れにくい（すなわちせん断強度が大きい）ものである。結局、そのような高性能な土塊とは、土粒子がぎっしりと詰まっており、間隙が少ない土塊とすることができる。

プロクターは、同じ粒度の土を様々な含水比に調整したものをを用いて、締固めて土塊を作る実験をした結果、最も密詰めにするための最適な含水比があることを見いだした。これをプロクターの指導原理と呼び、土質力学の三大原理のひとつに数えられる。

土の密詰めの度合いを表すための尺度は、間隙比、相対密度、乾燥密度などあるが、締固めの管理では乾燥密度  $\rho_d$  が用いられる。

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} = \frac{\rho_s \cdot V_s}{V} = \frac{\rho_s}{V/V_s} = \frac{\rho_w \cdot G_s}{(V_s + V_v)/V_s} = \frac{\rho_w \cdot G_s}{1+e} = \frac{\rho_w \cdot G_s}{1+G_s \cdot w/S_r} \quad (\because G_s \cdot w = S_r \cdot e)$$

$$\therefore \rho_d = \frac{\rho_w \cdot G_s}{1+G_s \cdot w/S_r} \quad (1)$$

乾燥密度  $\rho_d$  を縦軸に、含水比  $w$  を横軸において、式(1)をプロットすると図4に示すような曲線になる。ただし、2つの軸の変数以外に、もう一つのパラメータとなる飽和度  $S_r$  が式(1)に含まれているために、同じ土だからと言っても、締固め曲線式(1)は唯一のものとはならず、条件に応じて何本にもなる。

図に示すように締固め曲線は上に凸の曲線になり、最大値をもつ。その縦軸の最大値を**最大乾燥密度**  $\rho_{d \max}$  と呼び、その最大値を与える含水比を**最適含水比**  $w_{opt}$  と呼ぶ。すなわち、不飽和土を最も効果的に締固めるのに最適な含水量というものが存在することを表しており、砂浜の砂山で得た子供のころの経験を裏付けるものとなっている。

図4の締固め曲線は、最適含水比の時に最大乾燥密度となるが、それ以上含水量を増やしていく（すなわち図では右側にずれてゆく）と乾燥密度は低下してくる。その際、すべての締固め曲線はある曲線（図4中の太い破線）に漸近してゆくことがわかる。この曲線は、

$$\rho_d = \frac{\rho_w \cdot G_s}{1 + G_s \cdot w} \quad (2)$$

と表される。すなわち、式(1)の締固め曲線の飽和度  $S_r = 1$ （飽和土）の特別な場合に相当し、空隙がすべて水（飽和土）の場合に相当する。この場合、土によって比重  $G_s$  は一定であるので、変数は  $\rho_d$  と  $w$  だけとなり、式(2)は双曲線になることは容易にわかる。この式(2)の双曲線を、**ゼロ空気間隙曲線**と呼ぶ。先に「土によって比重  $G_s$  は一定である」と述べたが、土粒子の比重は実はバラついたとしてもせいぜい2.5～2.8とかその程度の範囲であるため、ゼロ空気間隙曲線はどのような土であってもほとんど同じとなることに注意する。

### (5) 締固め曲線が変動する要因

締固め曲線は、ゼロ空気間隙曲線に漸近して、何本も定義できるが、ではそのように何本にもなる要因には何があるのだろうか。要因は2つあり、1つは締固めるのに要するエネルギー（**締固めエネルギー**）であり、もう1つは締固める土の**粒度分布**である。

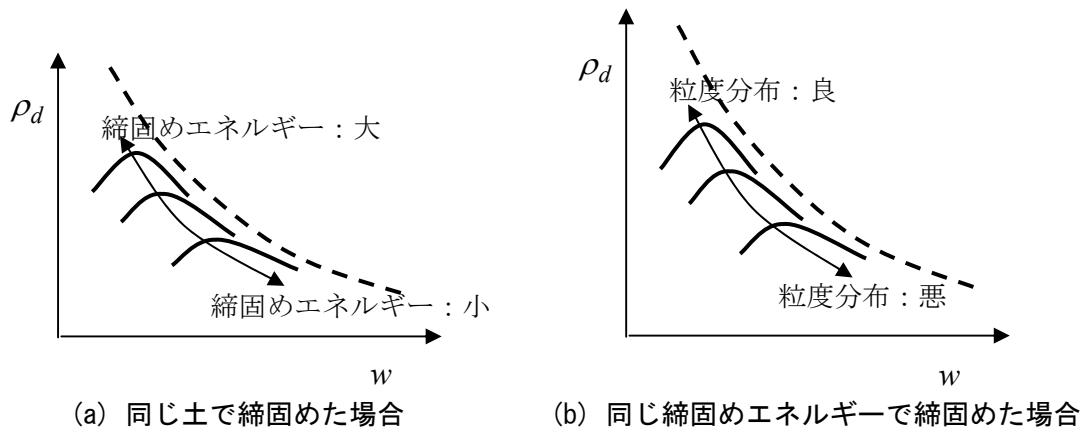


図5 締固め曲線の変動の要因

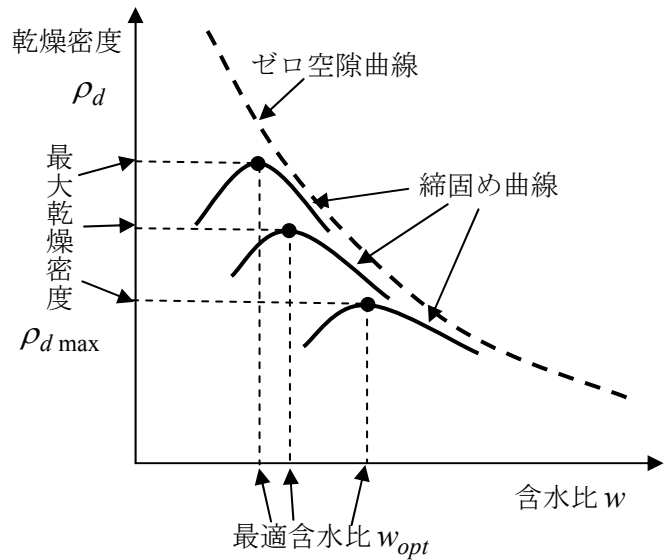


図4 締固め曲線

締固めエネルギーが大きく、また、粒度が良いほど、最大乾燥密度は大きくなり、それに応じて最適含水比は小さくなる。ちなみに粒度が良いとは、粒度分布（粒径加積曲線）が寝ている（様々な粒径の土がまざった）土のことであり、締固めをするのに「良い」ということである。

このように2つの要因により締固め曲線が異なるものになる原因は、土粒子間力であるサクションが、土粒子間の間隙水のメニスカスによって発揮されていることと密接に関連している。すなわち、締固め土ができるメカニズムは、概略以下のように説明できる。ある締固めエネルギーが加えられる（ランマーやローラーで突固められる）ことにより、土粒子は一旦、強制的に密詰め構造になる。しかし、含水比が小さすぎる場合、極端な場合は乾燥している場合には、突固められてせっかく密詰めになっても、土粒子間力が働かないために、密詰め構造が維持できずにバラバラに戻ってしまう。要するに、間隙水は、突固めによって強制的に作られる密詰め構造を維持するための粒子間力（サクション）を発揮するのに適度な量だけ必要になる。大きなエネルギーで締固めれば、より密詰めの構造をつくることができるが、その際には個々の土粒子間の距離も縮まるので、土粒子間に付着した間隙水が作るメニスカスが適度なサクションを発揮するには、曲率半径が小さくなる必要が生じるため、結果として含水比が小さい方がサクションは大きくなり、密詰め構造を維持するのに適した環境となる。また、粒度分布が良い土を用いる場合には、もともと大きな土粒子の隙間に小さな土粒子が入り込むために、密度が大きくなるのに加え、個々の土粒子間の距離も小さいので、やはり少ない量の間隙水の方が、メニスカスの曲率半径が小さくなり、大きなサクションを発揮する。

#### (6) 実施工における締固めⅠ（土の含水量）

突固め試験によって、最も土塊の密度を大きくすることができる最適含水比が得られたとする。もし、工事に用いるために用意した土の含水比が、最適含水比より小さかった場合には、施工時にその土をローラー等によって転圧する際に、最適含水比に近くなるように調整して水を散布しながら施工すれば最も効果的である。しかし、用意した土が最適含水比をすでに上回ってしまっているような場合には、乾燥させながら施工するのは非常に困難であるために、本来は施工には適さない土となる。特に細粒分が多く、かつ、含水比が高い場合には、へドロ状になってしまい全く施工には使用できないどころか、「汚泥（※実際にドロドロのだけで汚くなくても）」と分類されて産業廃棄物の扱いとなる。最近では、汚泥の処分費も馬鹿にならないことから、発生した現地において、脱水処理して再び土木材料として再利用するような試みも多く行われてきている。

#### (7) 実施工における締固めⅡ（効率の良い締固め）

突固め試験では、モールドと呼ばれる鉄製の円筒容器の中で土の突固めを行った。そのように非常に拘束が利いた容器の中では、締固めエネルギーが効率よく土に伝わり、締固めの効率が高くなる。これがビニール袋の中に土を入れて突固めても、全く締固まらないことは簡単に想像できる。実際の施工においても如何に拘束をかけたままで締固めを行うかは工夫のいるところである。

右図は盛土擁壁を作る場合の補強土工法の紹介である。この補強土工法では、締固め土塊内に、水平に30cm間隔でジオグリッドと呼ばれる伸び張力の大きい網状の補強材を敷き詰めて施工する（図中点線がジオグリッド敷設位置）。このジオグリッドを敷き詰めて、ローラーによる転圧締固めを行うと、広い範囲で土に拘束圧が加わり、コンクリートに匹敵するような非常に強固な土塊ができる。

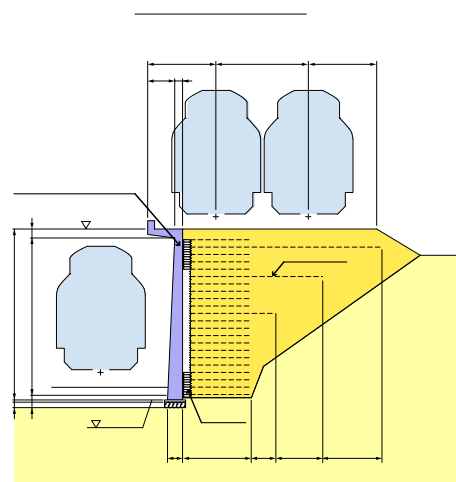


図6 補強土工法による盛土擁壁