

【土の締固め】

(1) 飽和土 (あるいは乾燥砂) と不飽和土

土は土粒子と土粒子の間隙の中の水と空気の 3 つの要素で構成されている。一般に、不飽和土の場合、「サクション (負圧): ※次節で説明」の効果により、間隙が完全に水に満たされた飽和土や間隙に全く水が無い乾燥砂に比べて見かけの「粘着力」が発生する。

(2) 不飽和土におけるサクション

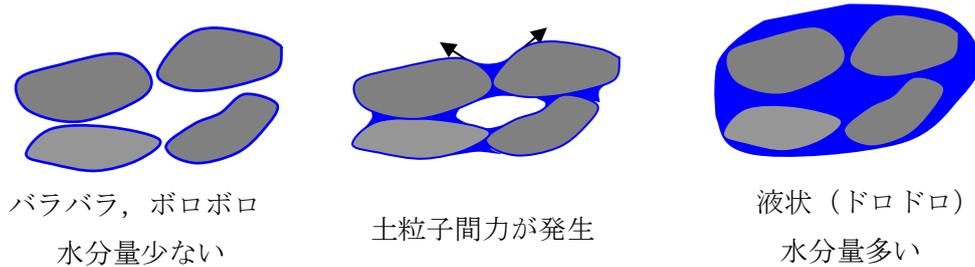


図 1 含水量による土粒子の付着の違い

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,

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

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。

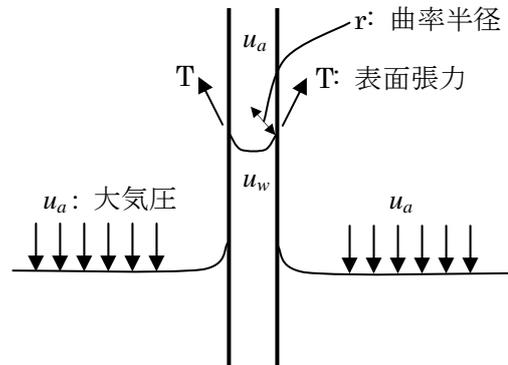


図 2 細いパイプ内の毛管水

(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、主にサクシオンによって成り立っている。サクシオ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オンが決まる。そのため、サクシオンは土の締固めにとって、非常に重要である。

(4) 突固め試験と最適含水比・最大乾燥密度

締固め土塊の粒子間に働くサクシオ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。

突固め試験（締固め試験とも呼ぶが正式名称は突固め試験）

右図に示すモールドとランマーを用いて行う。モールドの大きさは土の粒径によるが、それほど大きな粒径の土を用いる場合でなければ、通常は直径10cmのものを用いる。ランマーの質量は標準で2.5kgのものを用いるが、高い安定性を必要とする構造物のためには、4.5kgのものを用いる場合もある。締固める土は、モールド内に3層に分けて入れ、それぞれの層に対して15回ずつ、高さ30cmからランマーを自由落下させることにより突固める。土の種類によって、1層あたりの突固め回数を変えることにより、締固めエネルギーを変えて実験を行う。



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 ρ_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 ρ_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3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。

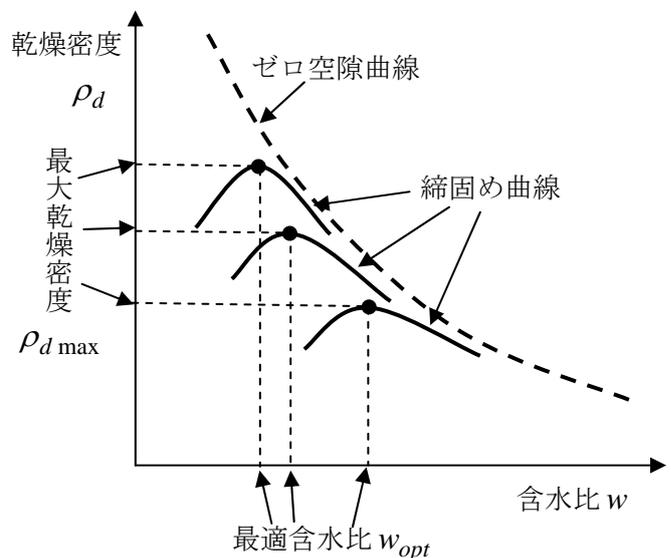


図3 締固め曲線

図3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3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、間隙がすべて水（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 ρ_d と w だけとなり、式(2)は双曲線になる。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。

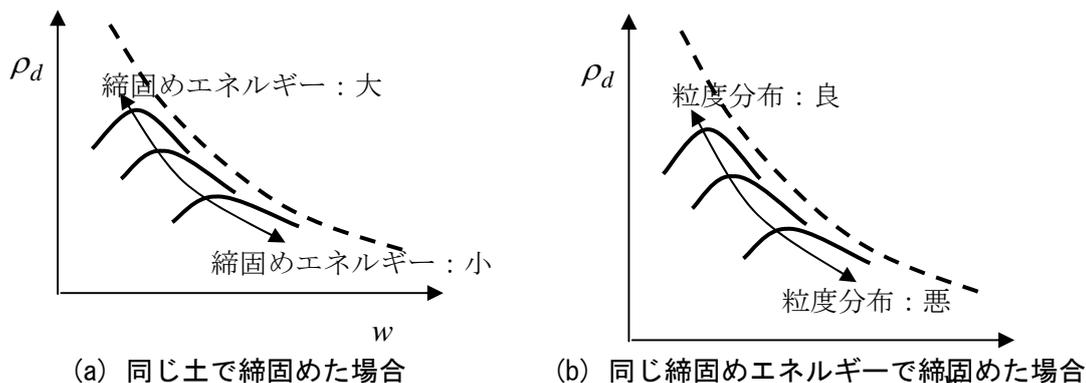


図4 締固め曲線の変動の要因

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、突固められてせつ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。

